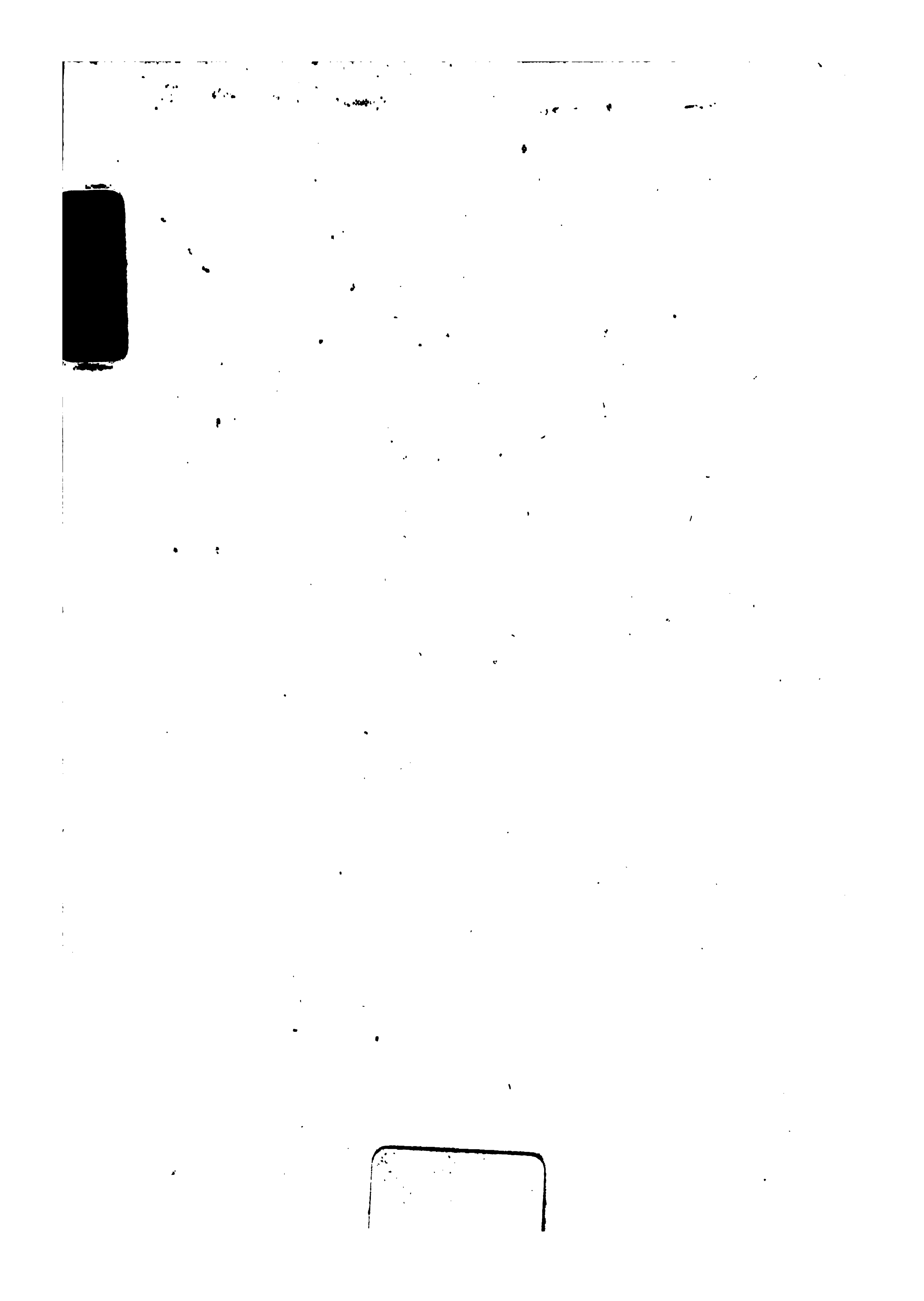
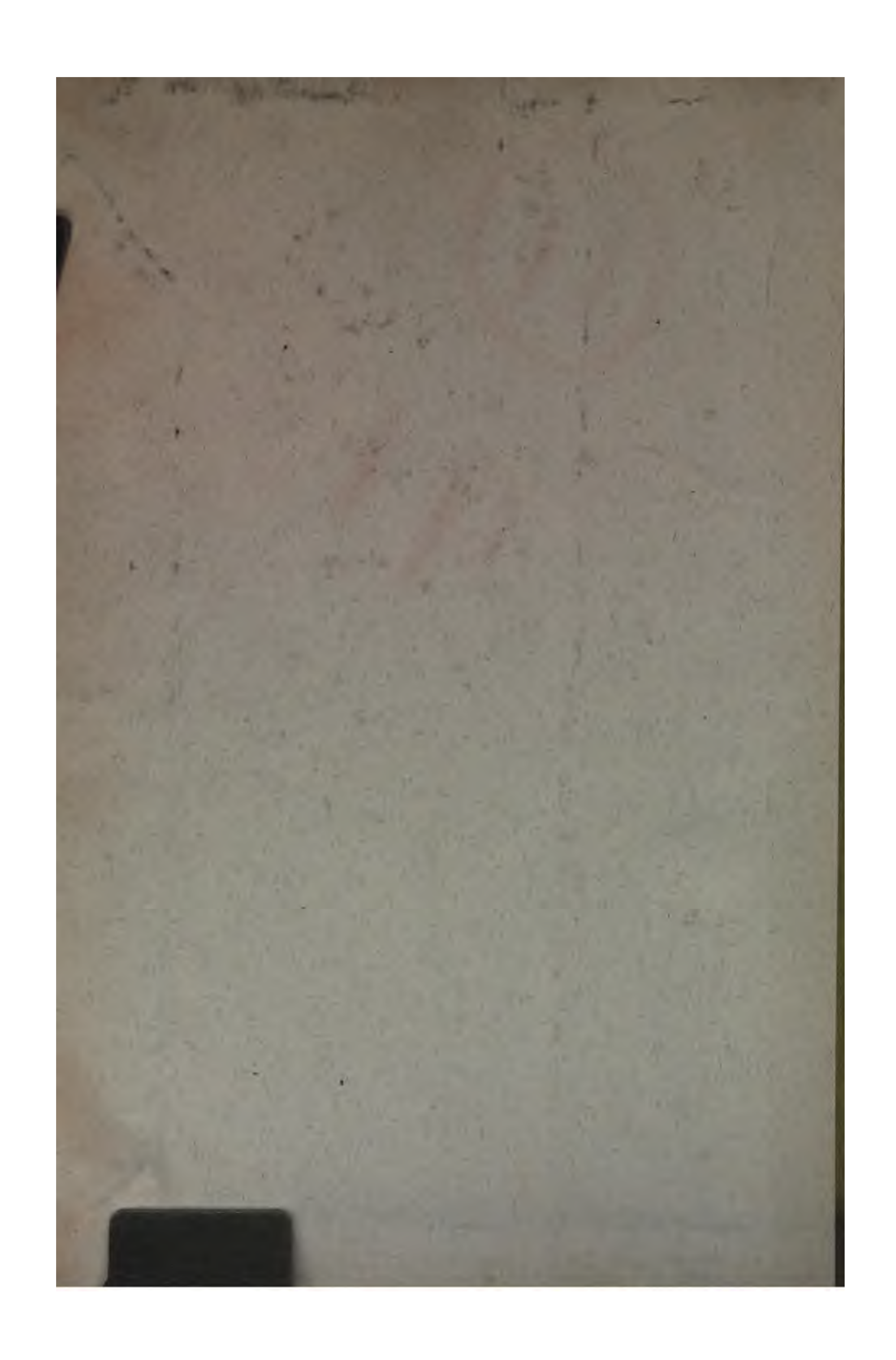
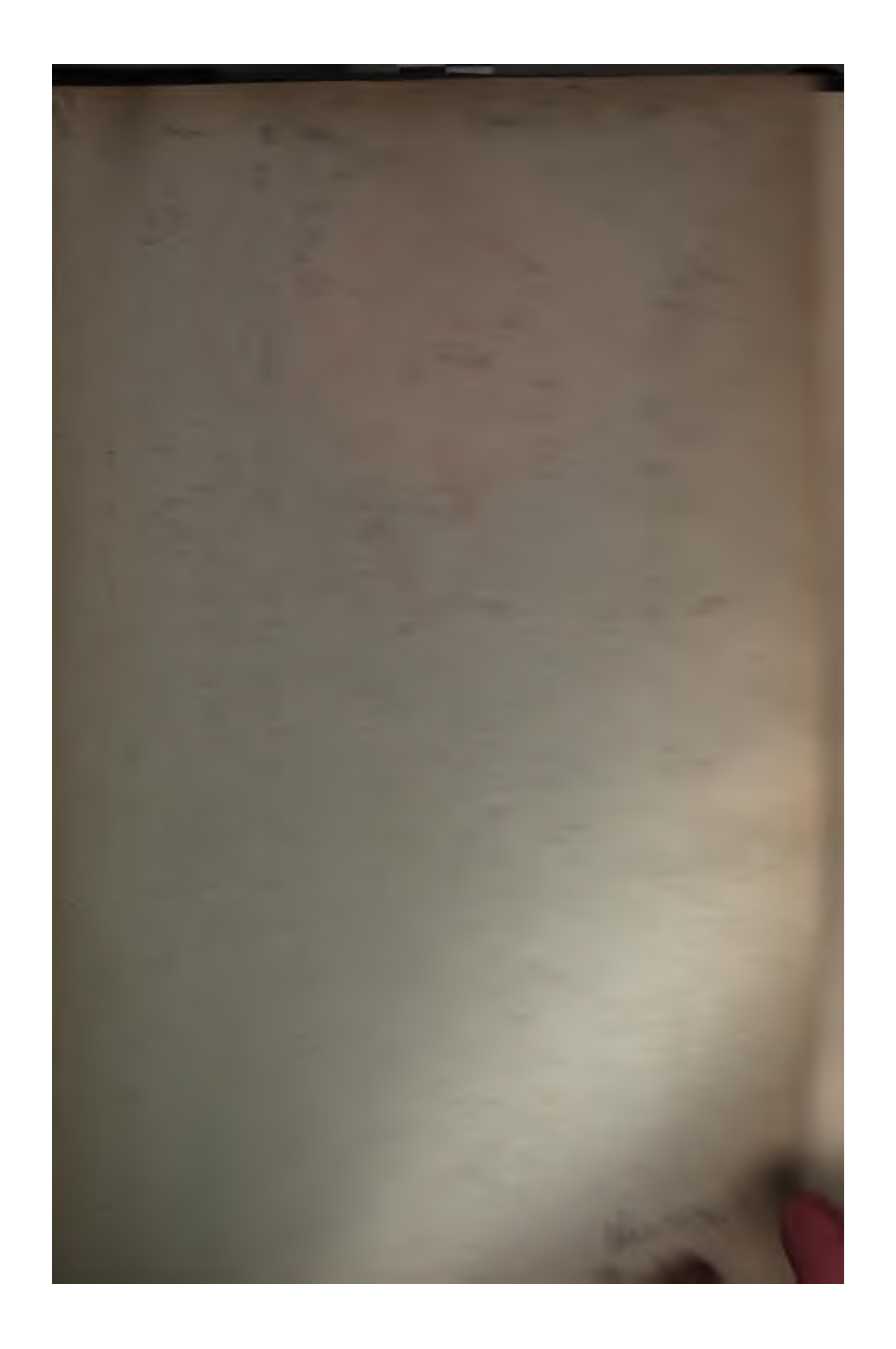

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06637482 2









Handbuch

der

Elektrotechnik

bearbeitet von

Professor Dr. **H. Ebert**, München. — Ingenieur **H. Eisler**, Wien. — Oberingenieur **V. Engelhardt**, Charlottenburg. — Kgl. Bayr. Obermaschineninspektor Dr. **B. Gleichmann**, München. — Professor Dr. **C. Heinke**, München. — Direktor **R. O. Heinrich**, Berlin. — Oberingenieur Dr. ing. **K. Hohage**, Berlin. — Postrat **O. Jentsch**, Erfurt. — Professor Dr. **J. Kollert**, Chemnitz. — Direktor **O. Krell**, Berlin. — Professor Dr. **F. Niethammer**, Brünn. — Geheimer Rechnungsrat **J. Noebels**, Vorsteher des Telegraphenbaubureaus des Reichs-Postamts, Berlin. — Regierungsbaumeister **Pforr**, Berlin. — Professor **Karl Pichelmayer**, Wien. — Oberingenieur **H. Pohl**, Berlin. — Postrat **A. Schluckebier**, Kiel. — Oberingenieur **E. Schulz**, Saalfeld. — Oberingenieur **H. Schwerin**, Charlottenburg. — Direktor Dr. **E. Sieg**, Köln. — Ingenieur **B. Soschinski**, Berlin. — Direktor **K. Wilkens**, Berlin. — Physiker **R. Ziegenberg**, Berlin

herausgegeben von

Dr. C. Heinke

Professor der Elektrotechnik an der Technischen Hochschule in München.

Sechster Band:

Die Leitungen, Schalt- und Sicherheitsapparate für elektrische Starkstromanlagen

von

H. Pohl und **B. Soschinski**.

Zweite und dritte Abteilung.

Leipzig

Verlag von S. Hirzel

1906.

Die Leitungen,
Schalt- und Sicherheitsapparate

für

elektrische Starkstromanlagen

von

H. Pohl und **B. Soschinski**
Oberingenieur. Ingenieur.

Zweite Abteilung.

Schaltanlagen, Montage der Leitungen und Kabel.

Bearbeitet von **H. Pohl.**

Mit 366 Abbildungen und 6 Tafeln.

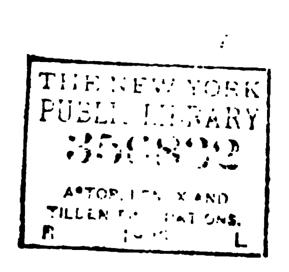
Dritte Abteilung.

Berechnung von Leitungsnetzen.

Bearbeitet von **B. Soschinski.**

Mit 159 Abbildungen.

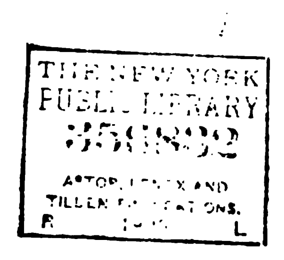
Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1906.



Druck von Fischer & Wittig in Leipzig.

Zweite Abteilung.

Schaltanlagen. — Leitungsverbindungen, Kabelgarnituren. — Verlegung der Kabel. — Freileitungen. — Verlegung der Leitungen in Innenräumen. — Persönliche Sicherheit und Feuersicherheit in elektrischen Anlagen.



Druck von Fischer & Wittig in Leipzig.

Zweite Abteilung.

Schaltanlagen. — Leitungsverbindungen, Kabelgarnituren. — Verlegung der Kabel. — Freileitungen. — Verlegung der Leitungen in Innenräumen. — Persönliche Sicherheit und Feuersicherheit in elektrischen Anlagen.

Vorwort.

Der vorliegende zweite Teil des sechsten Bandes des Handbuches der Elektrotechnik umfasst das ausserordentlich weit umfassende Gebiet der Verlegung der Leitungen. Hierher gehören nicht allein die zur Stromverteilung in grossen Netzen gehörenden Kabel, sondern auch die bis in die weitesten Verzweigungen reichenden Installationsleitungen, deren Konstruktion und Herstellung bereits in der ersten Hälfte dieses Bandes besprochen wurde. Bei der Besprechung der Montage der Kabel war es erforderlich, auch auf die verschiedenen Kabelgarniturteile näher einzugehen und im ferneren auch die verschiedenen Kabelschutzhüllen einer Betrachtung zu unterziehen. — Im Kapitel „Freileitungen" ist versucht, alles zusammenzustellen, was zu den immer mehr Bedeutung gewinnenden Fernleitungen gehört. Durch grössere Entfernungen lässt sich die heutige Technik nicht mehr von der Ausführung grösserer Kraftübertragungen zurückschrecken, und wo in den Gebirgen billige Wasserkräfte zur Verfügung stehen, da leiten dünne Drähte gewaltige Energiemengen den grösseren Industriecentren zu. Grosse Schwierigkeiten bieten hierbei die rechtlichen Verhältnisse, insbesondere Wege- und Telegraphengesetze u. s. w., ferner der Mangel ausreichender Enteignungsmöglichkeit. Es war daher auch erforderlich, hierauf etwas näher einzugehen. Der wachsenden Bedeutung der Freileitungen entsprechend haben sich Verlagsbuchhandlung und Autor entschlossen, von diesem Kapitel einen erweiterten Sonderdruck herauszugeben.

Mit der Erhöhung der Spannungen und mit dem immer weiteren Vordringen der Elektrotechnik in die weitesten Zweige unserer Industrie, demzufolge auch weitere Schichten der Bevölkerung mit elektrischen Anlagen in Berührung kommen, kann auch die Gefahr persönlicher Schädigungen grösser werden, wenn nicht durch die Art der Ausführung und durch geeignete Schutzmassregeln die persönliche Sicherheit gewährleistet wird. Aus diesem Grunde ist diesem Abschnitt besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Bei der Besprechung der Feuersicherheit elektrischer Anlagen ist besonders darauf hingewiesen, dass in feuer- und explosionsgefährlichen Räumen besondere Vorsicht walten muss. Indessen kann es dem Elektrotechniker nicht immer leicht sein, zu entscheiden, welche Räume unter diese Kategorie fallen. Es ist daher versucht, diese Frage allgemein zu beantworten, soweit es bei ihrer Schwierigkeit möglich ist.

Schliesslich erfülle ich noch die angenehme Pflicht, den verschiedenen Firmen, welche mich bei meiner Arbeit in umfassendem Masse unterstützt haben, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen, den ich auch für ihr liebenswürdiges Entgegenkommen der Verlagsbuchhandlung und ihren Beamten in gleichem Masse abstatte.

Pfingsten 1905.

H. Pohl.

Inhaltsverzeichnis.

Schaltanlagen.

Allgemeines.

Die Leitungsverbindungen.

Die Verlegung der Kabel und Leitungen.

Die Verlegung in besondere Kanäle und die Schutzmittel gegen mechanische Verletzungen von Kabeln.

Beispiele ausgeführter Kabelverlegungen.

Die Verlegung von Flusskabeln.

Die Montage der Grubenkabel.

Kosten für Kabelverlegungen.

Freileitungen.

Leitungsmaste.

Hölzerne Maste.

Imprägnierung der Holzmaste.

Eisenmaste.

Stangen in den Tropenländern.

Berechnung der Leitungsmaste, Durchhang der Leitungen.

Isolatorenträger.

Tragkonstruktionen, Gestänge und Traversen.

Das Leitungsmaterial für Freileitungen.

Die Isolatoren.

Das zur Herstellung von Isolatoren verwendete Porzellan und seine Fabrikation.

Untersuchung der Isolatoren.

Die Befestigung der Leitungen auf dem Isolator.

Allgemeine Anordnung der Freileitungen.

Kreuzungen von Freileitungen mit Strassen und Bahnkörpern.

Kabelverlegung.

Zusammenstellung der Installationsarten.

Persönliche Sicherheit und Feuersicherheit in elektrischen Anlagen.

Anleitung zur ersten Hilfeleistung bei Unfällen in elektrischen Betrieben.

Sicherheitsvorschriften.

Vorsichtsbedingungen für elektrische Licht- und Kraftanlagen.

Anweisung für das Betriebspersonal für elektrische Licht- und Kraftanlagen.

Isolationsfehler und deren Entstehung.

Seite

Massregeln zur Herbeiführung persönlicher Sicherheit in elektrischen Anlagen.

Vorsichtsmassregeln bei Arbeiten in elektrischen Anlagen während des Betriebes.

1. Bei Niederspannung.

2. Bei Hochspannung.

Schutz bei Bleiarbeiten.

Unfallverhütungsvorschriften für die Betriebe der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik.

Vorschriften für den Arbeitgeber.

Vorschriften für den Arbeitnehmer.

Unglücksfälle.

Die Feuersicherheit elektrischer Anlagen und Massregeln zur Erhaltung derselben.

Massregeln bei Bränden.

Die Gefährdung der Feuerwehr beim Anspritzen stromdurchflossener Drähte.

Benutzte Literatur.

Allgemeine Bauzeitung (Försters).
Archiv für Post und Telegraphie, Berlin.
Bulletin de la Société internationale des Electriciens, Paris.
Dinglers polytechnisches Journal, Berlin.
Electrical Review, London.
Electrical Review, New York.
Electrical World and Engineer, New York.
Elektrotechnischer Anzeiger, Berlin.
Electroteknisk Tidsskrift, Christiana.
Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin.
Fortschritte der Elektrotechnik, Berlin.
Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, Oldenburg.
La lumière électrique. Paris.
Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung, Wiesbaden.
Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien.

Baur, Das elektrische Kabel, Berlin.
Berufsgenossenschaft der Feinmechanik, Unfallverhütungs-Vorvorschriften.
Blavier, Nouveau traité de Télegraphie électrique, Bd. II.
Delamarche, Elemente der unterseeischen Telegraphie, übersetzt von C. Wichelmann, Berlin 1859.
Erhard, Der elektrische Betrieb im Bergbau, Halle.
Erlacher, Georg J., Elektrische Apparate, Hannover.
Friese, Das Porzellan.
Grawinkel und Strecker, Hilfsbuch für die Elektrotechnik, Berlin.
Grimm, Fabrikation des Feldspatporzellans, Wien.
Heinke, Handbuch der Elektrotechnik, Leipzig, Bd. VI, 1.
— Handbuch der Elektrotechnik, Leipzig, Bd. XII (abgekürzt Hdb.).

Herzog und Feldmann, Elektrische Beleuchtung, Berlin 1902.
Highton, Electric telegraf.
Hütte, Taschenbuch, Berlin.
Jaenicke, Geschichte der Keramik, Leipzig.
Kerl, Handbuch der Thonwarenindustrie, Braunschweig.
Ludewig, Bau von Telegraphenlinien.
Meili, Die elektrischen Stark- und Schwachstromanlagen und die Gesetzgebung, Zürich 1899.
Miller, Versorgung der Städte mit Elektrizität, München.
Monmerqué, Contrôle des installations électriques, Paris 1904.
Peschel, Hilfsbuch für die Montage elektrischer Leitungen, Leipzig.
Pflaghart, Die Elektrizität als Rechtsobjekt, Strassburg 1901.
Pohl, Montage elektrischer Anlagen, Hannover.
Reichspostamt, Denkschrift „50 Jahre elektrischer Telegraphie".
Uppenborn, Kalender für Elektrotechnik, München.
Verband Deutscher Elektrotechniker.
Normalien, Berlin.
Sicherheitsvorschriften für den Bau elektrischer Anlagen, Berlin.
Sicherheitsvorschriften für den Betrieb elektrischer Anlagen, Berlin.
Massregeln bei Bränden.
Vereinigung der Elektrizitätswerke.
Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften für den Betrieb elektrischer Anlagen.
Weber, C. L., Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften für den Bau elektrischer Anlagen, Berlin.
Wengler, Elektrizität und Recht, Leipzig 1900.
Wietz, Die elektrischen isolierten Leitungsdrähte, Leipzig.
Wiedemann, G., Elektrizität, Braunschweig.
Zetsche, Handbuch der Telegraphie, Leipzig.
Deutsche, englische, amerikanische Patentschriften.
Deutsche Gebrauchsmuster.

Schaltanlagen.

Allgemeines

1. Einleitung.

Der einfachste Fall der Verteilung[1]) der elektrischen Energie ist der, dass von einer Stromquelle aus nur eine Leitung nach dem Verbrauchsapparat führt und von da zurückkehrt. Ehe die Parallelschaltung gefunden war, fand diese einfache Stromverteilung, die Hintereinanderschaltung, einzig und allein statt. In diesem Fall ist nur eine doppelpolige Sicherung nötig, ein Schalter erübrigt sich, da die Maschine abgestellt wird, wenn die Stromlieferung aufhören soll. Es waren also nur wenige Apparate erforderlich, die meistens noch unmittelbar an der Maschine montiert wurden.

Nach Einführung der Parallelschaltung, bei deren Anwendung von einem Punkte oft viele Leitungen ausgehen, in welche Sicherungen, Messinstrumente und Schalter eingeschaltet werden müssen, wurde es erforderlich, alle diese Apparate in geeigneter Weise zusammenzufassen. Es geschieht dies auf Schalttafeln oder durch besondere Apparate-Zusammenstellungen. Hierher gehören nicht allein die kleinen Sicherungstafeln, wie sie früher[2]) erwähnt wurden, die Schalttafeln kleiner und grosser Zentralen, sondern auch die über mehrere Räume verteilten Schaltanlagen, die insbesondere in Hochspannungsanlagen üblich geworden sind und bei denen die Bedienung aller Hochspannungsapparate so ermöglicht wird, dass eine Gefahr für den Schaltbrettwärter nicht besteht.

Die Zusammenfassung der gesamten zur Bedienung einer Anlage erforderlichen Apparate an einem Punkt hat in erster Linie den Zweck, eine bequeme, schnelle und betriebssichere Schaltung zu ermöglichen und im Falle der Gefahr durch Herbeiführung rascher Abschaltung Störungen im Netz zu verhüten. Um diesen Zweck voll erfüllen zu können, müssen die Schaltanlagen so angeordnet sein, dass sie einen raschen Überblick gewähren. Die Leitungsführung muss so übersichtlich sein, dass sich auch derjenige, dem die Schaltung fremd ist, ohne übermässig grossen Zeitverlust orientieren kann. Wesentlich unterstützt wird eine bequeme Bedienung durch möglichst klare Bezeichnung der einzelnen Apparate. Insbesondere ist dies wichtig für die Sicherungen, welche in Verteilungsleitungen angeordnet sind. Infolgedessen verlangen die

---

1) Die Stromverteilungssysteme werden näher behandelt von SOSCHINSKI, Hdb. VI, 3 und von WILKENS, Hdb. VII.

2) Hdb. VI, 1: Sicherungen.

Sicherheitsvorschriften für diese, dass sie mit Bezeichnungen versehen sein müssen,[1]) aus denen hervorgeht, zu welchen Räumen bezw. Gruppen von Stromverbrauchern sie gehören. Es ist nun durchaus nicht erforderlich, alle die Räume auf der Schalttafel namentlich aufzuführen, die eine Leitung mit Strom versorgt, es genügen Zahlen oder Buchstaben, die in einem besonderen Verzeichnis erläutert sind. Durch Anbringung eines Schaltungsschemas in unmittelbarer Nähe der Schaltstelle wird die Übersicht erleichtert.

Bei der Konstruktion der Schalttafeln ist darauf Rücksicht zu nehmen, dass alle Apparate, an denen geschaltet werden muss, so angeordnet sind, dass sie bequem bedient werden können. Sie werden daher zumeist in handlicher Höhe befestigt und wo dieses, wie z. B. bei Hochspannungsschaltern, nicht möglich ist, durch Zugseile[2]) oder Zugstangen bewegt, deren Griffe im Handbereich liegen.

Wichtig ist auch die Reihenfolge, in welcher die Apparate in den Stromkreis eingeschaltet werden. Üblich ist es ja, unmittelbar hinter jedem Abzweig die Sicherung folgen zu lassen und darauf den Schalter. Diese Anordnung ist aber bei Schalttafeln nicht immer unbedenklich, da in diesem Falle die Sicherung stets unter Spannung eingesetzt werden muss. Man verändert daher häufig bei den Schaltanlagen die Reihenfolge und setzt den Schalter zuerst. Dann ist allerdings der Schalter ungesichert und kann, wenn ein Kurzschluss an den Leitungen zwischen Schalter und Sicherung eintritt, zerstört werden. Indessen dürfte die letztere Anordnung wohl den Vorzug verdienen, da die Wahrscheinlichkeit eines Kurzschlusses an der betreffenden Stelle bei guter Ausführung der Anlage nicht besonders gross, dagegen die erhöhte persönliche Sicherheit von grösster Bedeutung ist.

2. Anordnung der Schalttafeln.[3])

Es ist zu unterscheiden zwischen Schalttafeln, welche an der Wand befestigt werden und solchen, welche frei stehen. Die ersteren sind meistens nur kleinere Verteilungstafeln. Bei diesen macht die Leitungsführung einige Schwierigkeiten. Auf der Vorderseite werden die Leitungen nicht mehr gern verlegt; ordnet man sie in diesem Fall aber auf der Rückseite an, so sind sie unzugänglich und die Anschlüsse unkontrollierbar, weil die Tafel unmittelbar an der Wand oder doch nur mit geringem Abstand von ihr befestigt wird.

Die Montage der zu diesen Tafeln führenden Leitungen erfolgte häufig so, dass von einem Mann die Schalttafel von der Wand abgehalten wurde, der andere stellte die Verbindung her und dann wurde die Schalttafel an die Wand gepresst, was in der Regel nicht ohne Beschädigung der Leitungen abging, da diese, um die Schalttafel zum Zwecke der Befestigung der Leitungen weit genug von der Wand abrücken zu können, sehr lang gelassen werden mussten. Derart zusammengepresste Leitungsbündel waren dann eine Quelle von Erd- und Kurzschlüssen. Um diese zu vermeiden, müssen die Leitungen durch die Schalttafel geführt und an ihrer Vorderseite derart befestigt werden, dass es möglich ist, die Tafel nach Lösung der Schraubverbindungen frei abheben zu können. Die Verbandsvorschriften schreiben daher auch vor,[4]) dass an Verteilungstafeln, welche nicht von der Rückseite aus zugänglich

1) § 4 f. der Sicherheitsvorschriften.

2) Vgl. Hdb. VI, 1: Schalter, Fig. 174, 175, 176.

3) Über die Massnahmen zur Erzielung hoher „persönlicher Sicherheit" vgl. diese Hdb. VI, 2.

4) § 4 e.

sind, die „Leitungen nach Befestigung der Tafel angeschlossen und die Anschlüsse jederzeit von vorn kontrolliert und gelöst werden können".[1]) Die Konstruktion der Anschlüsse kann jedoch auch so getroffen werden, dass die Leitungen am oberen Rand der Tafel enden und dort in Klemmen eingeführt werden, deren Druckschrauben von der Vorderseite der Schalttafel angezogen werden können. Eine derartige viel verwendete Konstruktion rührt von den SIEMENS-SCHUCKERT-Werken her. Sind die Schalttafeln indessen auf der Rückseite zugänglich, wie dies bei freistehenden Tafeln fast stets der Fall sein wird, so sind bestimmte Entfernungen zwischen ihnen und der Wand inne zu halten, je nach der Anordnung der Apparate.

Sind auf der Rückseite stromführende ungeschützte Teile vorhanden, so muss zwischen diesen und der gegenüberliegenden Wand eine Entfernung von 1 m liegen. Die Entfernung kann jedoch kleiner gewählt werden, wenn die stromführenden Teile sorgfältig der Berührung entzogen sind.

Wird die hinter der Schalttafel liegende Wand zur Anbringung von Apparaten mit herangezogen, so ist zwischen diesen und den auf der Rückseite der Schalttafel befindlichen stromführenden Teilen eine Entfernung von 2 m inne zu halten und dieser Raum durch Geländer zu teilen (siehe Fig. 16). Diese Anordnung[2]) ist nötig, „weil es vorkommen kann, dass der Bedienungsmann beim Arbeiten auf der einen Seite einen elektrischen Schlag erleidet und dann gegen die stromführenden Teile fällt, denen er den Rücken zukehrt".

Selbstverständlich stellen die vorstehend angegebenen Masse Mindestwerte dar, die häufig überschritten werden, zumal wenn es sich um Hochspannungsanlagen handelt.

3. Material der Schalttafelplatten.

Es ist noch nicht lange her, dass selbst in den grössten Zentralen die Schalttafeln aus Holz bestanden. Die zeitweise auftretenden Schalttafelbrände bewiesen jedoch so klar, dass Holz ein für diesen Zweck durchaus ungeeignetes Material ist, dass es heute sogar in kleineren Anlagen verpönt ist, auch dann, wenn jede durchgehende Leitung durch Isoliertüllen vom Holz getrennt wird.

Es ist aber noch gestattet, Holztafeln bis zur Grösse von 0·5 qm zu verwenden, aber nur als Konstruktions-, niemals als Isolationsmaterial. Besser ist es aber, auch Tafeln dieser Grösse nur im äussersten Notfall aus Holz herzustellen.

Die Gründe für die Forderung feuersicherer Schalttafeln erörtert WEBER[3]) ausserordentlich treffend in seinen Erläuterungen zu den Vorschriften: „Es ist wohl vielfach behauptet worden, dass gutes hartes Holz in trockenem Zustande ein vorzüglicher Isolator sei. Hiergegen ist zu bemerken, dass eine scharfe Grenze zwischen hartem und weichem, leicht entflammbarem Holz nicht existiert. Ferner, dass eine Holztafel, auch wenn sie aus sachgemäss gewähltem Material besteht und in trockenem Zustande aufgestellt wird, durch ungünstige Verhältnisse an einzelnen Stellen unbemerkt Feuchtigkeit aufnehmen kann, sodass ihr Isolationsvermögen verschwindet. Es sei ferner daran erinnert, dass gerade an Schaltbrettern Erwärmungen nicht durch Überlastung der Leitungen, sondern durch mangelhaften Kontakt besonders häufig sind, welch letztere Erscheinung sich unter Umständen, z. B.

---

1) Vgl. S. 28.
2) Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften von Dr. C. L. WEBER, 7. Aufl., S. 33.
3) WEBER, Erläuterungen zu § 4a der Sicherheitsvorschriften. 7. Aufl., S. 32.

infolge fortgesetzter Erschütterungen (in Maschinenräumen), allmählich und unbemerkt einstellt. Auch die durch den normalen Betrieb bedingte abwechselnde Erwärmung und Abkühlung der Schmelzsicherungen bewirkt eine allmähliche Lockerung der Kontaktschrauben. Hierzu kommt noch, dass die Holztafeln sich leicht werfen oder reissen,[1]) und zwar um so mehr, je grösser sie sind. Dabei sind schon Porzellanbestandteile der Apparate zerstört, auch Zähler und andere Messgeräte in Unordnung gebracht worden. Die grossen Stromstärken, welche an Schaltbrettleitungen herrschen, machen es erklärlich, dass auch scheinbar geringfügige Fehler schwerwiegende Folgen nach sich ziehen.

Zu den im vorstehenden gegen das Holz geltend gemachten Bedenken tritt bei Hochspannung noch das weitere Moment hinzu, dass bei Spannungen von mehreren Tausend Volt auch trockenes Holz sich wie ein Leiter verhält und direkt entflammt werden kann. Hier ist es also als wirklicher Bestandteil der Tafeln grundsätzlich ausgeschlossen. Die Zulassung zur Umrahmung ist nur mit Rücksicht auf Schönheitsgründe geschehen und es ist dabei vorausgesetzt, dass die Umrahmung von den stromführenden Teilen weit entfernt bleibt."

Es werden daher fast ausschliesslich Platten aus Marmor, Schiefer und künstlichem Stein verwendet. Unter den verschiedenen Marmorsorten wird dem weissen entschieden der Vorzug gegeben. Schwarzer Marmor, der dem weissen in elektrischer Beziehung durchaus ebenbürtig ist, ist weniger beliebt, da er zu hart ist. Die bunten, marmorierten Sorten sollen nur mit Vorsicht verwendet werden, da sie häufig leitende Metalladern enthalten. Aus dem gleichen Grunde wird Schiefer mit Misstrauen betrachtet. Indessen sind gut ausgewählte Schieferplatten für Spannungen bis 500 Volt gut verwendbar.

Da die Steinplatten gegen Stösse sehr empfindlich sind, so ist bei der Bearbeitung vorsichtig zu verfahren. An den Befestigungsstellen sind auch elastische Zwischenstücke (Pappe) zwischen Eisenrahmen und Platte anzuordnen.

4. Die Umrahmung.

Da die Schalttafeln in den Zentralstationen als besondere Zierde gelten, wird den Umrahmungen bisweilen die grösste Aufmerksamkeit geschenkt. Sie bestanden früher ausschliesslich aus Holz, und zwar wurde der Umrahmung aus Eichenholz zumeist der Vorzug gegeben. Mit der fortschreitenden Erkenntnis der Unzulänglichkeit des Holzes für den Schalttafelbau im allgemeinen nahm die Verwendung von Eisen auch für die Umrahmung zu. In vielen Fällen, besonders wenn die Marmortafeln möglichst dicht aneinander gereiht werden, verzichtet man auch wohl ganz auf eine Umrahmung (Fig. 13).

Jedenfalls ist Eisen aus Sicherheitsgründen der Verwendung von Holz auch hier vorzuziehen, ganz abgesehen davon, dass auch vom künstlerischen Standpunkt Einwendungen gegen Umrahmungen aus Eisen nicht erhoben werden können (vgl. z. B. Fig. 14 u. 15).

5. Anordnung der Apparate.

Je einfacher und übersichtlicher die Apparate angeordnet werden, um so besser ist es. Man wird daher auch auf der vorderen Seite einer Schalttafel nur diejenigen Apparate anbringen, die zur Überwachung und Schaltung unbedingt erforderlich sind. Hierher gehören in erster Linie die Messinstrumente für die Maschinen, die Maschinenschalter und die Handräder der Regulatoren.

Im übrigen wird man Schalter, die zwar ab und zu, aber selten bedient werden, wie z. B. die in Hauptabzweigleitungen liegenden, gern hinter

1) Um diesen Übelstand zu beseitigen werden grosse Holztafeln parkettiert.

den Schalttafeln oder in besonderen Schalträumen anbringen. Desgleichen werden alle Instrumente, die zur Kontrolle (insbesondere der Isolation) dienen, in besonderen Messräumen untergebracht, sofern deren Beobachtung dem Betriebsingenieur obliegt.

Alle Leitungen, Sammelschienen, offene Sicherungen sind auf der Vorderseite verpönt.

Die Übersichtlichkeit wird erhöht durch die Teilung der Schalttafel in verschiedene Felder, deren Anordnung und Grösse so gewählt wird, dass jedes für sich eine bestimmte Gruppe von Apparaten zusammenfasst. So ist z. B. für jede Maschine u. s. w. ein besonderes Feld vorzusehen, welches zur Erläuterung mit den Bezeichnungen „Maschine I", „Batterie-Ladung" u. s. w. versehen wird.

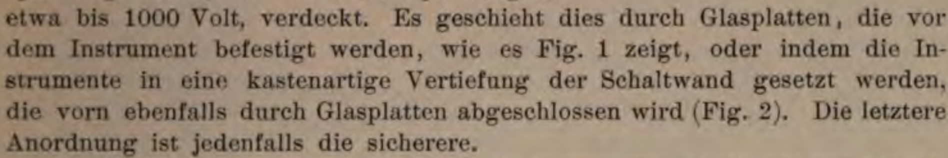


Fig. 1.

Die Messinstrumente liegen bei Niederspannung offen, bei höheren Spannungen, etwa bis 1000 Volt, verdeckt. Es geschieht dies durch Glasplatten, die vor dem Instrument befestigt werden, wie es Fig. 1 zeigt, oder indem die Instrumente in eine kastenartige Vertiefung der Schaltwand gesetzt werden, die vorn ebenfalls durch Glasplatten abgeschlossen wird (Fig. 2). Die letztere Anordnung ist jedenfalls die sicherere.

In Hochspannungsanlagen erhalten die Instrumente überhaupt nur Niederspannung unter Vermittlung von Strom- und Spannungstransformatoren.

Die Widerstände können vor und hinter der Schalttafel angeordnet werden oder auch räumlich von ihr getrennt sein. Die erstere Anordnung, die selten angewendet wird, zeigt Fig. 2. Hierbei sind die Widerstandskästen vor der Tafel stehend angeordnet. In anderen Fällen nimmt ein Rahmen den Widerstandskasten auf, das Handrad ragt durch die vordere Verkleidung. Ein Nachteil dieser Anordnung ist der, dass man an den Stufenschalter nicht gut heran kann. Man dreht daher gern den Kasten um und verlängert die Welle nach rückwärts, sodass nun das Handrad auf dieser hinteren Verlängerung sitzt, der Stufenschalter aber dem Wärter zugekehrt ist, wenn er hinter der Schalttafel steht.

Liegen die Widerstände räumlich getrennt von der Schalttafel, so findet eine Übertragung durch Seile, Ketten oder Gestänge, auch wohl durch Schnecke und Schneckenrad statt (Fig. 3 und 24).

6. Schalttafeln für Gleich- u. Wechselstrom.

An und für sich sind Gleichstromschalttafeln mit Apparaten für Akkumulatoren komplizierter als solche für Wechsel- bezw. Drehstrom, wenn auch bei den letzteren dem persönlichen Schutz grössere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Am wichtigsten ist dies bei solchen Schalttafeln, welche gleichzeitig Drehstrom und Gleichstrom, event. auch e i n e Stromart, aber verschiedene Spannungen führen. Wird von Wechselstromzentralen ausser einer niederen Spannung auch Hochspannung abgegeben, so verlegt man die die letztere führenden Apparate und Leitungen in einen abgeschlossenen Raum, wie es Fig. 2 zeigt. Von der für 500 Volt bestimmten Schalttafel führen hier besondere Leitungen nach dem im Hintergrunde sichtbaren

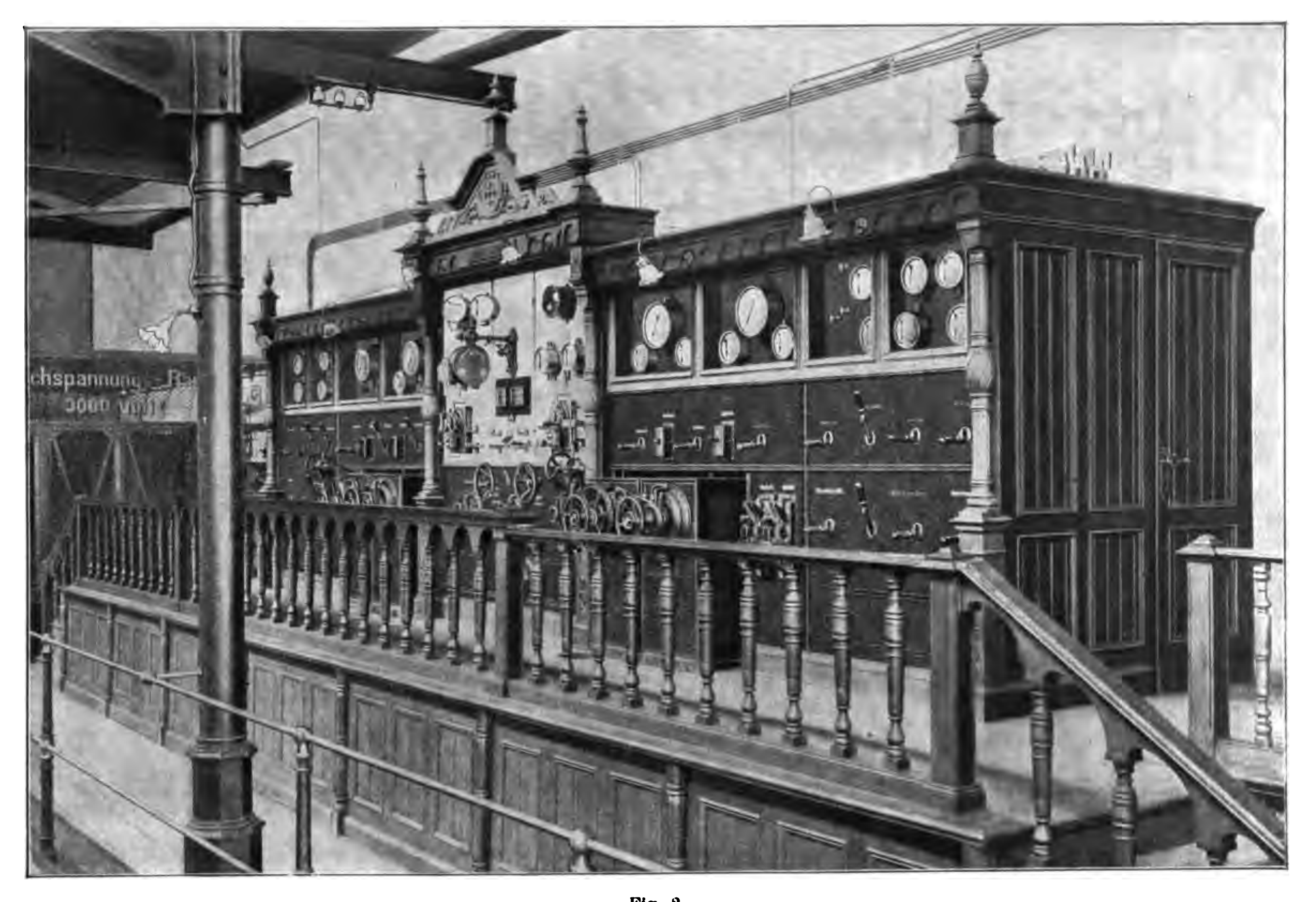


Fig. 2.

Fig. 3.

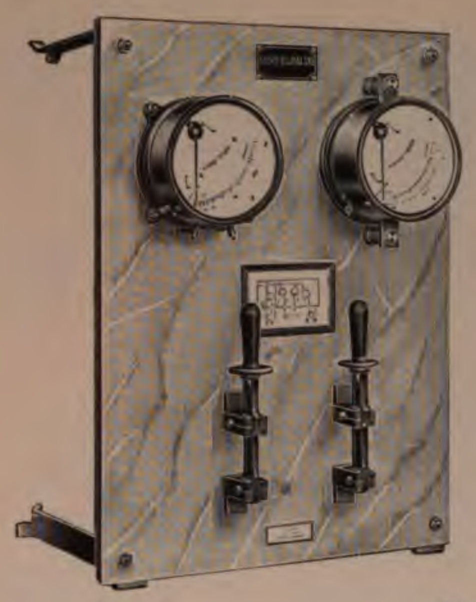
abgetrennten Teil, in welchem die Spannung von 500 auf 3000 Volt transformiert wird. Die Leitungen für diese Transformatoren sowie ihre Anschlüsse liegen vollständig geschützt.

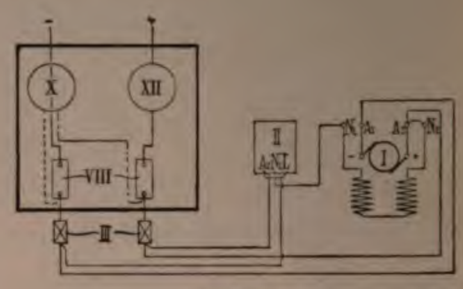
Die Konstruktion der Schaltanlagen.

7. Einteilung der Schaltanlagen.

Die Konstruktion der Schaltanlagen kann sehr verschieden sein; es lassen sich etwa die folgenden Gruppen bilden:

1. Kleine Schalttafeln, bei denen nur eine Platte vorhanden ist, die an der Wand befestigt wird.

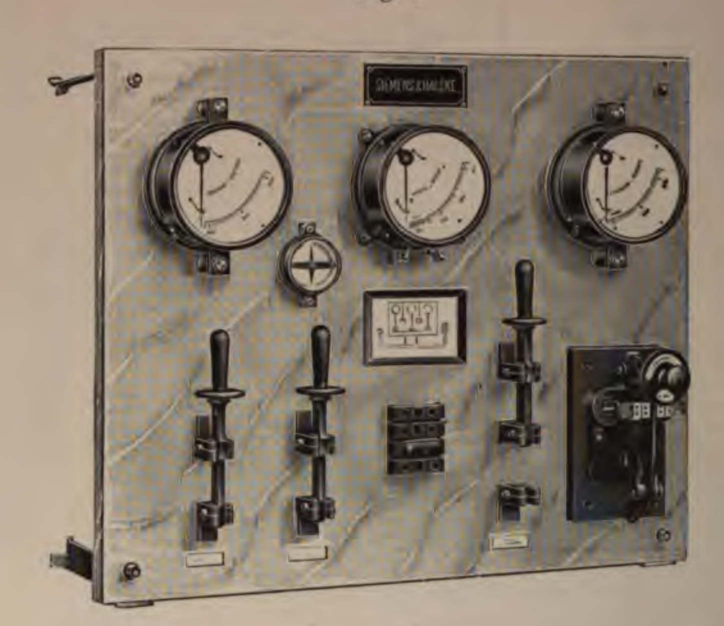




Schaltung.

I Dynamo.
II Regulierwiderstand.
III Sicherung.
VIII Einpoliger Ausschalter.
X Spannungszeiger.
XII Stromzeiger.

Fig. 4.



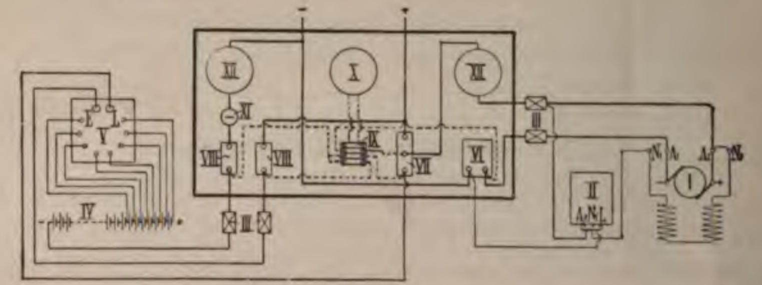


Fig. 5.

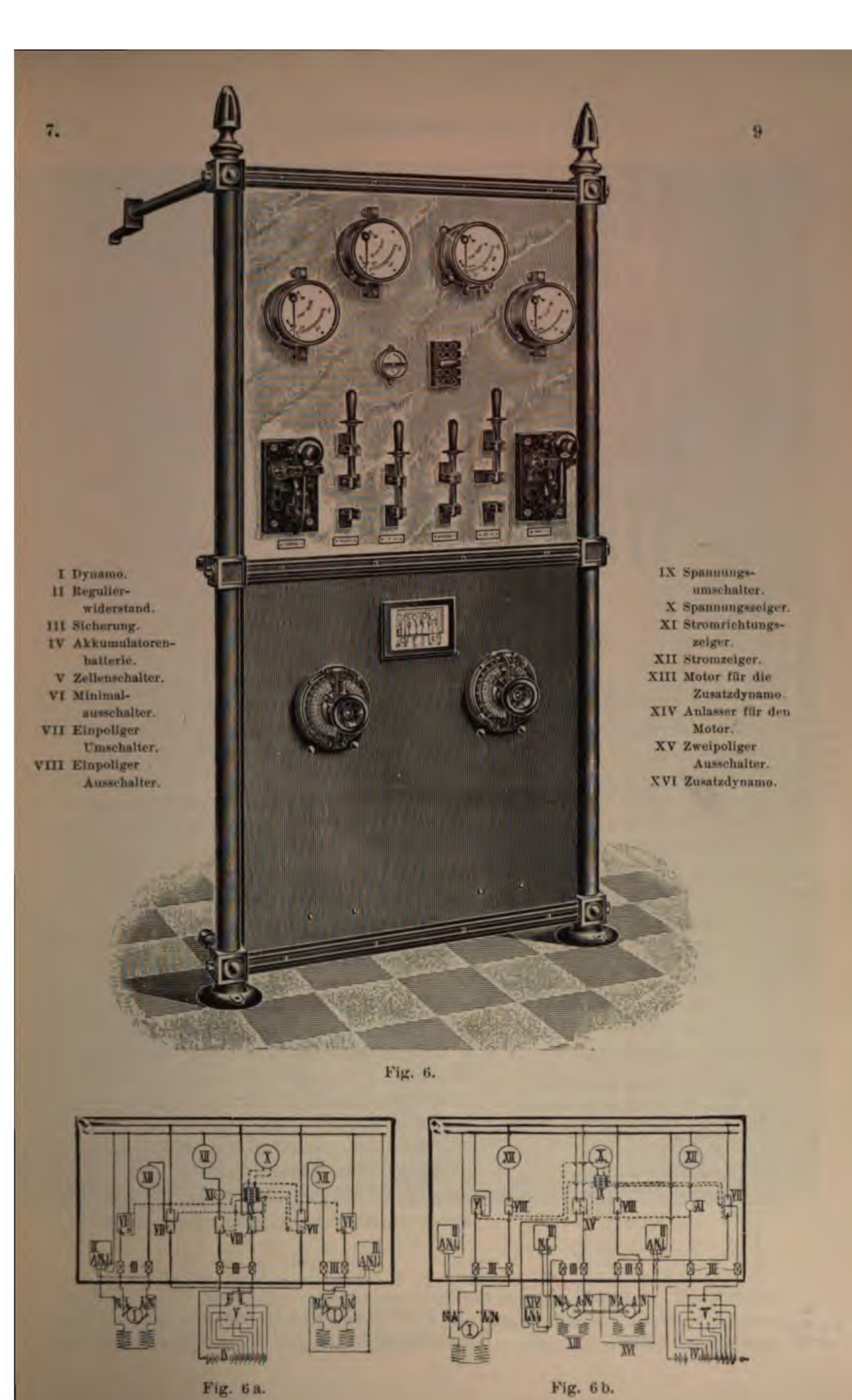
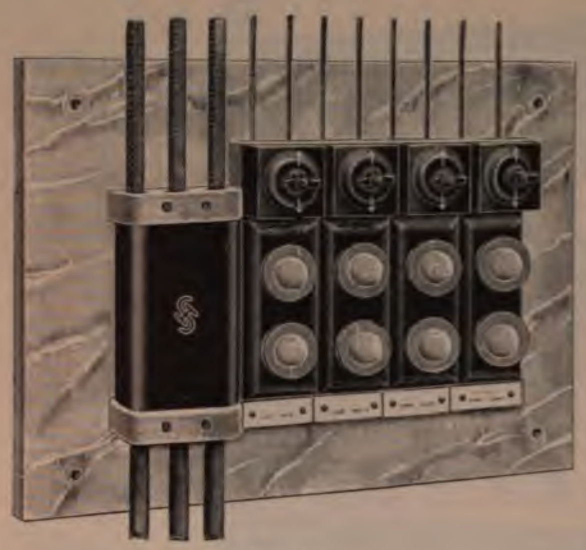


Fig. 6.

Fig. 6 a.

Fig. 6 b.


Fig. 6 c.

2. Freistehende Schalttafeln mit Eisengerüst.
   a) Die Platten nehmen die ganze Fläche der Schalttafel ein.
   b) Die Platten bedecken nur die obere Hälfte, die untere wird durch eine Eisenkonstruktion gebildet.
   c) Die Platten fallen ganz weg; alle Apparate werden direkt auf das Eisengerüst montiert.
3. Schaltsäulen, Schaltpulte, Schaltschränke.
4. Schaltanlagen, die sich über mehrere Räume verteilen.

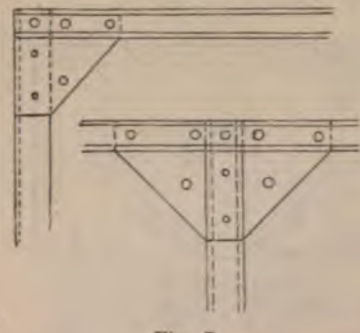
1. Kleine Schalttafeln.

8. Kleine Schalttafeln, welche an der Wand befestigt werden.

Wie bereits gesagt, ist es zulässig, dieselben aus Holz anzufertigen, solange ihre Grösse 0·5 qm nicht überschreitet. Ein Hauptgrund für die Beibehaltung des Holzes ist der Preis und dies um so mehr, als bei Schalttafeln fast stets andere Anordnungen getroffen werden, also Einzelanfertigung stattfindet. Für gewisse Fälle haben indessen die Siemens-Schuckert-Werke die Schalttafeln aus Marmor normalisiert, und zwar zunächst für drei Fälle. Es fassen die betreffenden Normalkonstruktionen zusammen:

1. Die Apparate für eine Gleichstromdynamo (Fig. 4).
2. Die Apparate für eine Gleichstromdynamo und Batterie (Fig. 5).
3. Für zwei Gleichstromdynamos mit Batterie (Fig. 6 a) oder eine Dynamo mit Zusatzdynamo und Batterie (Fig. 6 b).

Die ersten beiden sind normalisiert für Ströme von 50, 100, 200, 400 Amp., die Anordnung 3 für Stromstärken von 100, 200, 400 Amp. Auf jeder der Tafeln ist, wie die Abbildungen zeigen, das Normalschaltungsschema angebracht. — Zu den kleinen Schalttafeln müssen ferner die im Hdb. VI, 1 Fig. 268, 271, 275, 278 u. 301 wiedergegebenen Verteilungssicherungen gerechnet werden. Die Siemens-Schuckert-Werke haben diese Tafeln durch die Hinzufügung besonderer Schalter noch weiter ausgebildet und so eine gedrängte und übersichtliche Anordnung geschaffen (Fig. 6 c).


Fig. 7.

2. Freistehende Schalttafeln.

9. Das Eisengerüst.

Für freistehende Schalttafeln werden Eisengerüste gebaut, die entweder sichtbar sind

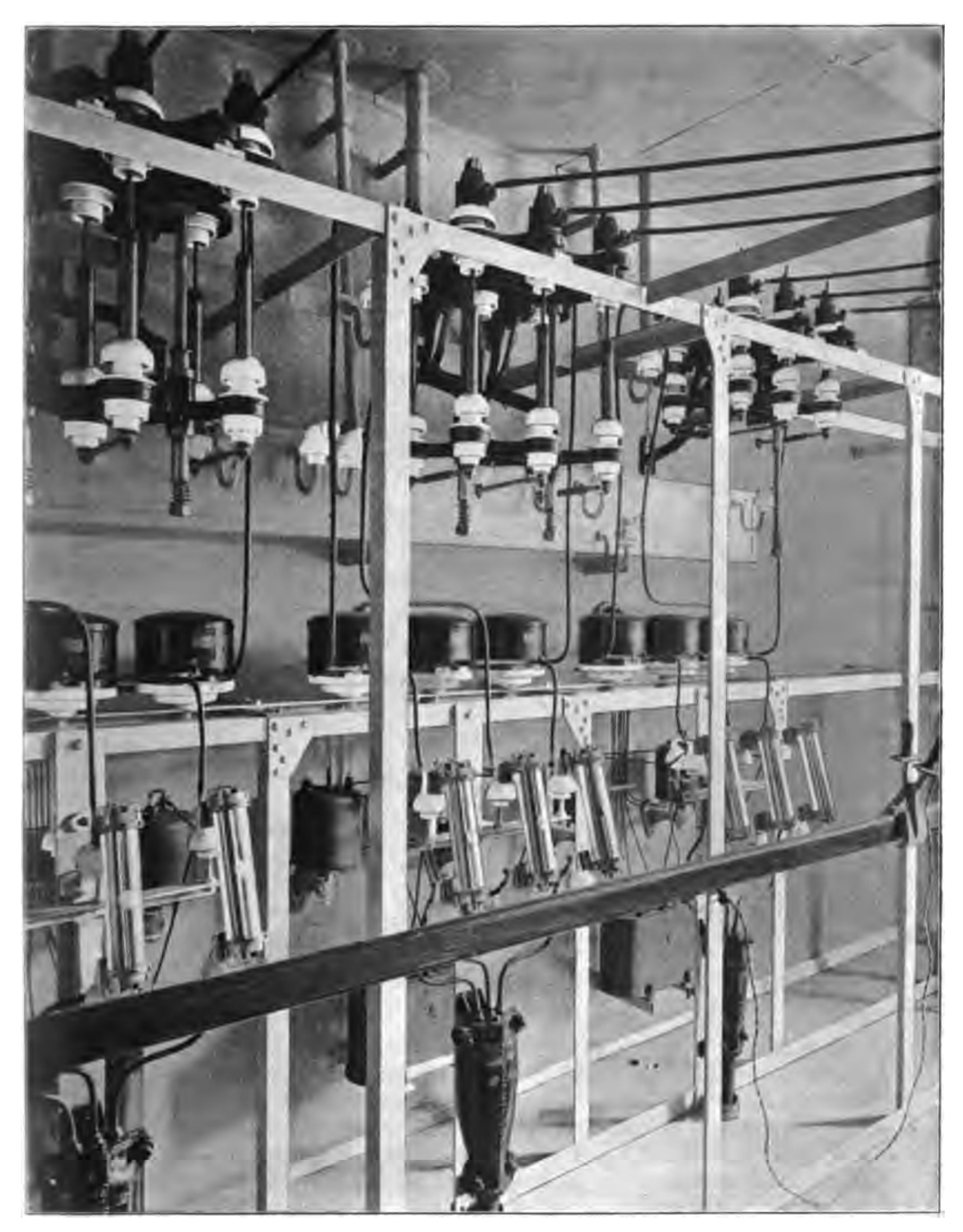


Fig. 8.

(Fig. 10) oder durch die Steinplatten verdeckt werden (Fig. 13). Sie werden aus L und ⊔-Eisen zusammengesetzt, die Ecken durch dreieckige Platten verbunden (Fig. 7 u. 8). Diese versteifen das Gerüst und dienen gleichzeitig

zur Befestigung der Platten. Jedenfalls werden die horizontalen Eisen so angeordnet, dass sich die Platten in ihrer ganzen Breite auf sie stützen und die Befestigungsbolzen in den Platten zum Tragen nicht herangezogen werden.

Reichen die Platten nicht ganz bis zum Fussboden, so wird der untere Teil der Schalttafel meistens durch Eisenblech verkleidet, welches entweder perforiert ist oder durch besonders aufgesetzte Leisten verziert wird.

Nach der Wand zu werden in der Regel Winkeleisen als Stützen angebracht, die in die Wand eingelassen werden. Damit sie dort den nötigen Halt bekommen, werden sie gespalten und aufgebogen. Sie dienen gleichzeitig als Träger für die Isolatoren (Fig. 8, 16 und 24).

Da die Schalttafeln in verschiedene Felder[1]) eingeteilt werden, so wird die Eisenkonstruktion so eingerichtet, dass sie aus einzelnen Elementen besteht, die eventuell in der einfachsten Weise eine Erweiterung gestatten.

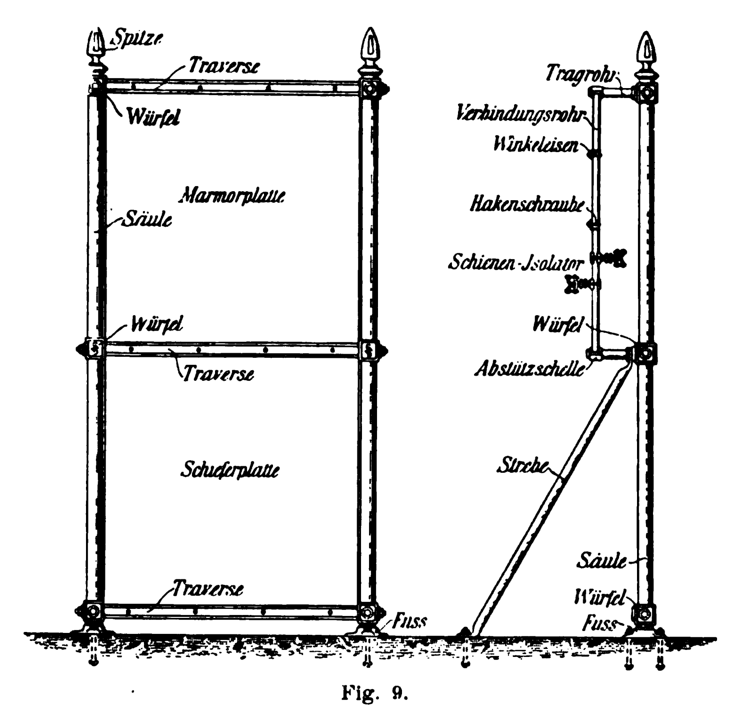


Fig. 9.

Die Aufstellung des Eisengerüstes erfolgt in Niederspannungsanlagen in der Regel auf dem Maschinenfussboden ohne isolierende Zwischenglieder. Hat man es aber mit einer Dreileiteranlage mit geerdetem Mittelleiter zu thun, so isoliert man gern das ganze Eisengestell gegen Erde, da jede metallische Verbindung zwischen einem Aussenleiter und dem Gerüst, also Erde, Kurzschluss bedeutet.

Auch bei Hochspannungsanlagen findet diese Isolierung bisweilen statt, selbst wenn man die Apparate durch vorzüglich isolierende Zwischenlagen vom Gerüst trennt.[2])

10. Eiserne Normal-Schalttafeln der Siemens-Schuckert-Werke.

Um möglichst einheitlich zu arbeiten, sind auch die Gerüste normalisiert worden; es sind in Fig. 6 und 9 bis 12 diejenigen der Siemens-Schuckert-Werke dargestellt. Diese bieten gegenüber den allgemein üblichen Konstruktionen verschiedene Vorteile, denn die Gerüste bestehen aus verhältnismässig wenigen und vor allem aus normalen Eisenteilen, die stets zu erhalten sind. Ein Zusammensetzen kann daher, ebenso wie eine Erweiterung, ohne jede Schwierigkeit vorgenommen werden.

Die Felder der Normalschalttafeln können mit Marmor-, Schiefer- oder Eisenplatten versehen werden. Die Marmorplatten werden auf der Vorder-

1) Vgl. S. 5.

2) Näheres über die Anordnungen zum persönlichen Schutz an Schalttafeln siehe Hdb. VI, 2: Persönlicher Schutz.

seite poliert und auf der Rückseite lackiert, die Schieferplatten geschliffen geliefert. Etwaige unbenutzte Felder werden gewöhnlich durch Eisenplatten ausgefüllt; die Breite der Felder beträgt ca. 1 m. Fig. 6 und 9 zeigen eine freistehende Normalschalttafel in einfacher Ausführung nebst Bezeichnung der Einzelteile. An der Rückseite der Schaltwand befindet sich ein Traggerüst, welches aus horizontalen Tragrohren und vertikalen Verbindungsrohren besteht, die durch Abstützschellen miteinander verbunden sind. An den Verbindungsrohren können Schienenisolatoren für Sammelschienen oder — mittels kleiner Hakenschrauben — auch Winkel- oder Flacheisen für die Aufnahme von Apparaten angebracht werden.

Fig. 10 zeigt die Normalschalttafel in etwas reicherer Ausführung; sie unterscheidet sich von der vorstehend beschriebenen nur dadurch, dass die

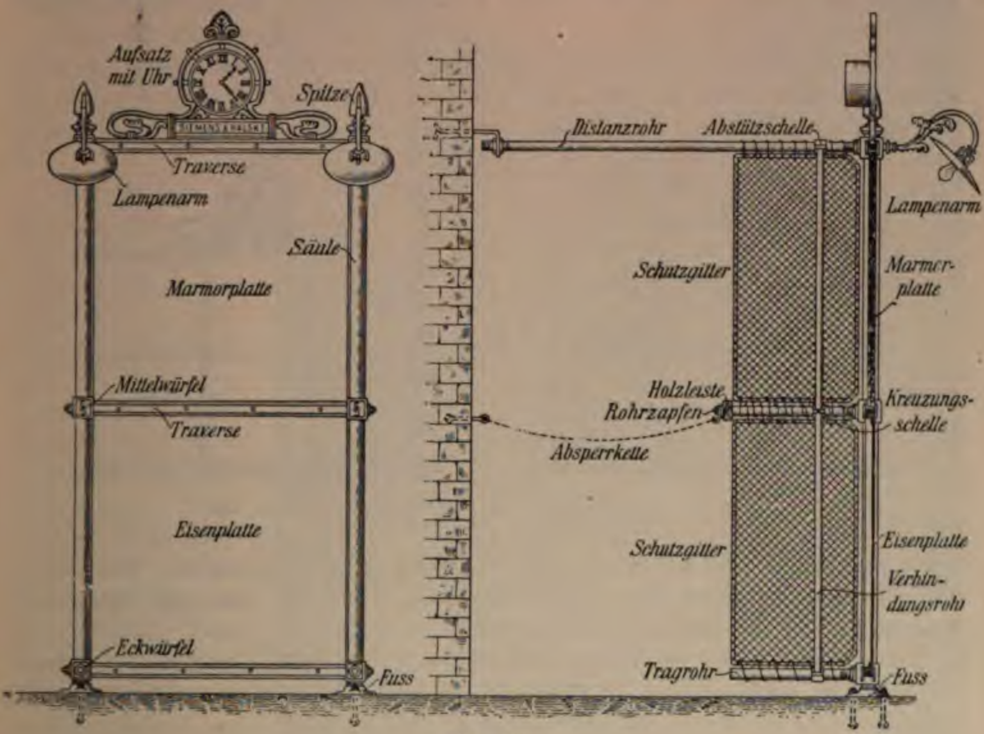


Fig. 10.

oberen Würfel, welche die Traversen mit der Säule verbinden, Lampenarme haben und die Traverse einen schmiedeeisernen Aufsatz mit Uhr trägt. Das Traggerüst unterscheidet sich ebenfalls von dem der einfacheren Konstruktion dadurch, dass die Schalttafel durch Verlängerung der oberen Tragrohre (Distanzrohre) an der Wand befestigt werden kann. Ein Schutzgitter, Absperrkette und Holzleiste sind zum Schutz gegen Berühren der stromführenden Teile angeordnet. An den Distanz- bezw. Tragrohren können Winkel- oder Flacheisen zur Montage von Isolatoren u. s. w. befestigt werden.

Für grössere Schaltanlagen sind die in Fig. 11 und 12 dargestellten Konstruktionen vorgesehen. Fig. 11 unterscheidet sich von den bereits erwähnten Einzeltafeln nur durch das erhöhte Mittelfeld, also durch die beiden längeren Säulen und die höhere Marmorplatte für das Mittelfeld. Fig. 12

stellt eine Schalttafel mit drei gleich hohen Feldern und einem breiten Aufsatz dar. Diese Anordnung kann auch für freistehende Schalttafeln von grösserer Tiefe verwendet werden und empfiehlt sich bei solcher von 500 mm und mehr, und wenn das Traggerüst schwere Apparate, z. B. Ölschalter, aufnehmen soll.

Sind nicht allein an den Vorder-, sondern auch an den Seitenflächen von Schalttafeln Apparate anzuordnen, so lassen sich aus den Einzelteilen bequem entsprechende Erweiterungen ausführen.

11. Schalttafeln, bei denen die Platten die ganze Fläche der Tafel einnehmen.

Die äusseren Platten werden in die ⊔-Eisen des Gerüstes gelegt. Wo die Platten zusammenstossen, liegen Flacheisen, auf denen die Platten durch Messingschrauben befestigt werden (Fig. 13). Hierbei stossen die Platten so dicht zusammen, dass Abschlussleisten nicht erforderlich sind. Höchstens werden die Platten an diesen Stellen sauber facettiert. Kommen die Platten nicht ganz zusammen, vielleicht, weil ein Teil des Eisengerüstes dazwischenragt, so werden die Stossstellen durch besondere Zierleisten (Fig. 14) verdeckt. Diese Leisten können aber auch direkt zur Befestigung der Platten herangezogen werden. Fig. 13 zeigt eine amerikanische Schalttafel mit sehr

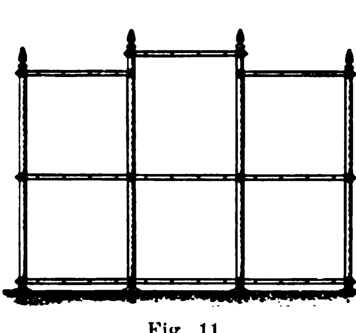
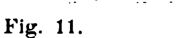



Fig. 11.

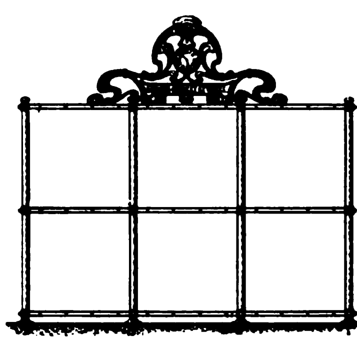


Fig. 12.

grossen Marmorplatten, sie ist ohne Umrahmung ausgeführt. Wesentlich kleinere Platten zeigt die Schalttafel in Fig. 14, die mit einer kunstvoll geschmiedeten Eisenumrahmung versehen ist.

Da sehr lange Schalttafeln nüchtern wirken, wenn alle Teile derselben in gleicher Höhe ausgeführt sind, so werden die mittleren Felder erhöht angeordnet.

12. Schalttafeln, bei denen nur die obere Hälfte mit Platten bedeckt ist.

Fig. 15 zeigt eine derartige Schalttafel. Des besseren Aussehens wegen sind auch hier die mittleren Felder gehoben. Der untere Teil besteht aus Blechen, auf welche Zierleisten aufgesetzt sind. Die Widerstände sind so hinter der Schalttafel angeordnet, dass ihre Stufenschalter aus der unteren Blechverkleidung herausragen. Ihrer Höhe wegen ist auch die untere Blechverkleidung in den Mittelfeldern höher gezogen als an den Seiten. Die Umrahmung besteht aus Holz.

Diese Schalttafel umfasst nicht nur die zum Betriebe der Zentralstation erforderlichen Apparate, auf ihr sind auch die zur Stromverteilung in ihre einzelnen Zweige erforderlichen Sicherungen und Schalter angebracht, und zwar sind für diesen Zweck die Seitenfelder gewählt. Statt der in Fig. 15 gekennzeichneten Art der Bleche könnten auch perforierte verwendet werden.

13. Schaltanlagen ohne Platten.

Sollen an Verteilungspunkten grössere Mengen von Sicherungen u. s. w. zusammengefasst werden, die in ihrer Grösse wenig voneinander differieren;

so wird ein Eisengerüst angefertigt, auf dessen Traversen die Sockel der Apparate direkt aufgeschraubt werden.

Die ausgedehnteste Verwendung finden diese Anordnungen in Hochspannungsanlagen, bei denen die durch Porzellan isolierten stromführenden Teile auf Eisen befestigt werden (vgl. Fig. 20).

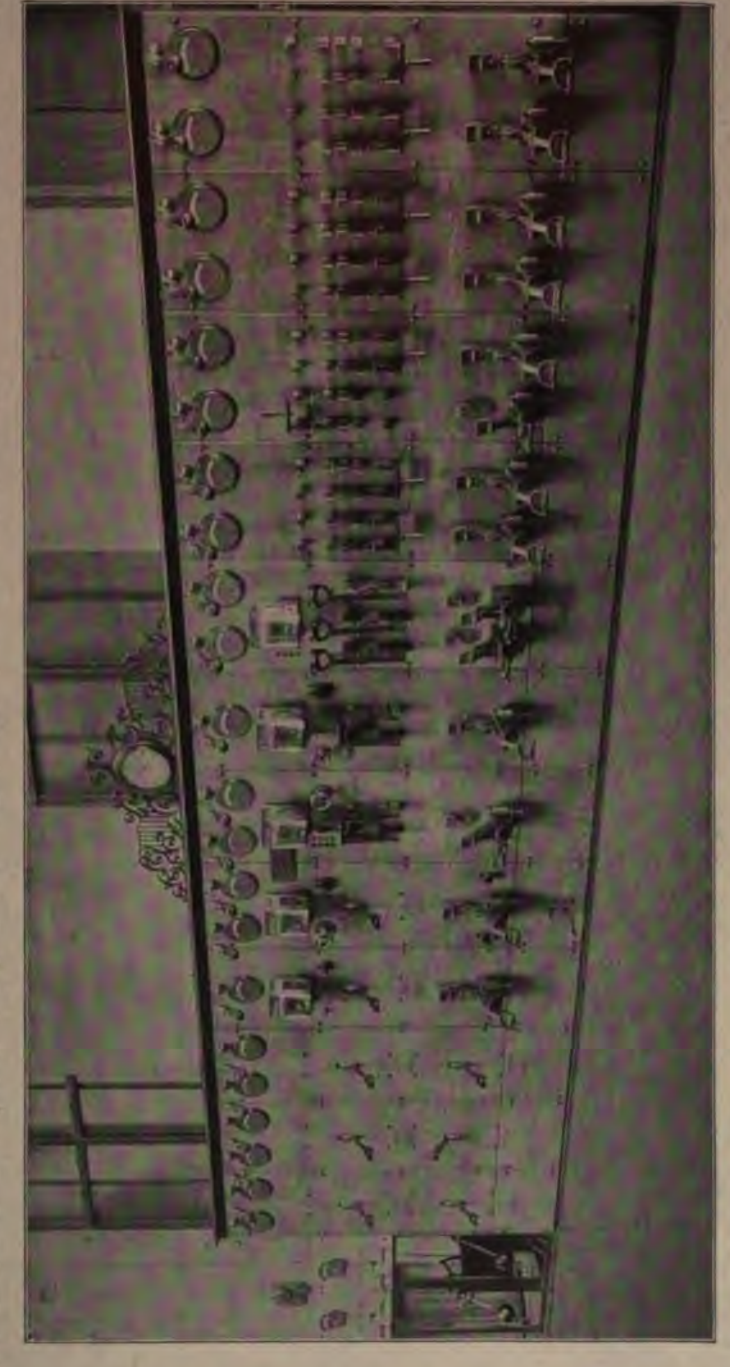


Fig. 13.

3. Schaltsäulen, Schaltpulte und Schaltschränke.

14. Schaltsäulen.

Schalttafeln erfordern einen verhältnismässig grossen Platz, der z. B. dann nicht zur Verfügung steht, wenn die zu einer Maschine gehörenden Schalt- und Messapparate in unmittelbarer Nähe der Maschine untergebracht werden sollen. Es werden in diesem Falle die notwendigsten Messapparate an einer Säule angeordnet und die zugehörigen Schalter und Widerstände so angebracht, dass sie durch Hebel bezw. Handräder, welche ebenfalls an der Säule befestigt sind, bedient werden können. So zeigt z. B. Fig. 176 in Hdb. VI, 1, S. 248 eine Schaltsäule der Maschinenfabrik Örlikon mit dem darunter liegenden Schalter. In Fig. 16 dieses Bandes wird die gesamte Schaltanlage der Zentrale der Basler Strassenbahn wiedergegeben,



Fig. 14.

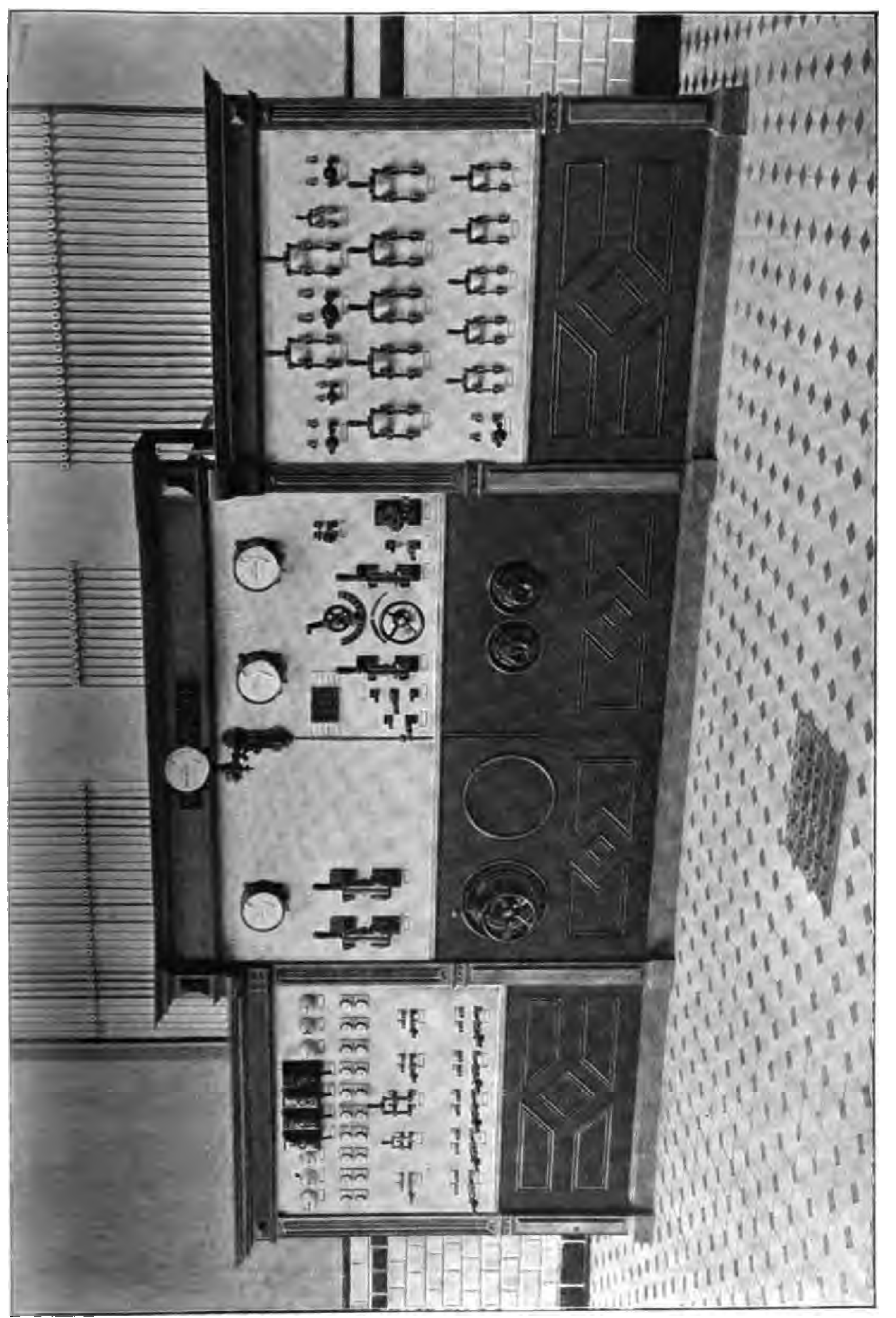


Fig. 15.



Fig. 16.

in welcher die oben erwähnten Schaltsäulen Verwendung gefunden haben. Im Prinzip gleichartig, aber in der Konstruktion verschieden, sind die Schaltsäulen von Voigt & Haeffner, welche Fig. 17 wiedergiebt.

Aber nicht nur innerhalb der Zentralen sind Schaltsäulen Bedürfnis, fast noch mehr auf freier Strecke, an den Speisepunkten ausgedehnter Kabel- und Freileitungsnetze. Hier richtet sich die Konstruktion nach der Art der Leitungsführung.

Finden Kabel Verwendung, so kann ein besonders gedrungener Bau gewählt werden. Im Anschluss an Freileitungen werden runde Säulen, kleine Häuschen und dergl. angewendet, die in ihrer Mitte als Verlängerung einen eisernen Mast haben (Fig. 18), an welchem die Freileitungen abgespannt sind. Im Inneren des Mastes[1]) wird dann ein Kabel herabgeführt. Vielfach werden derartige Schaltanlagen gleichzeitig als Transformatorenstationen verwendet und zeigt Fig. 18 eine derartige Anordnung. —

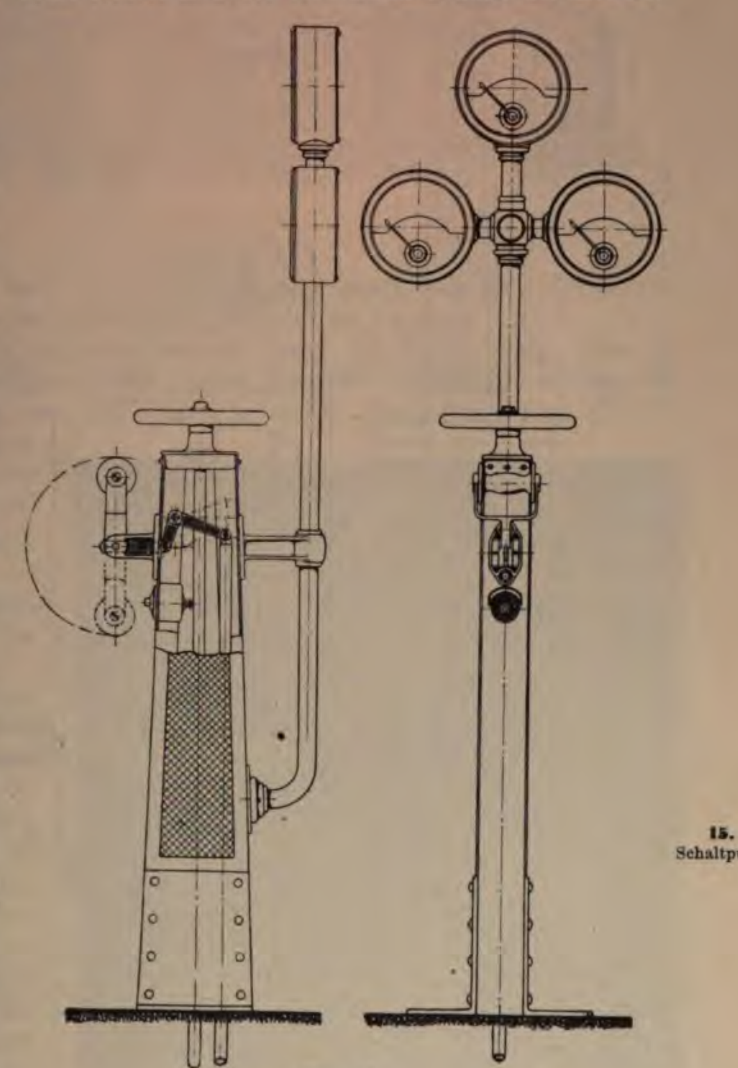


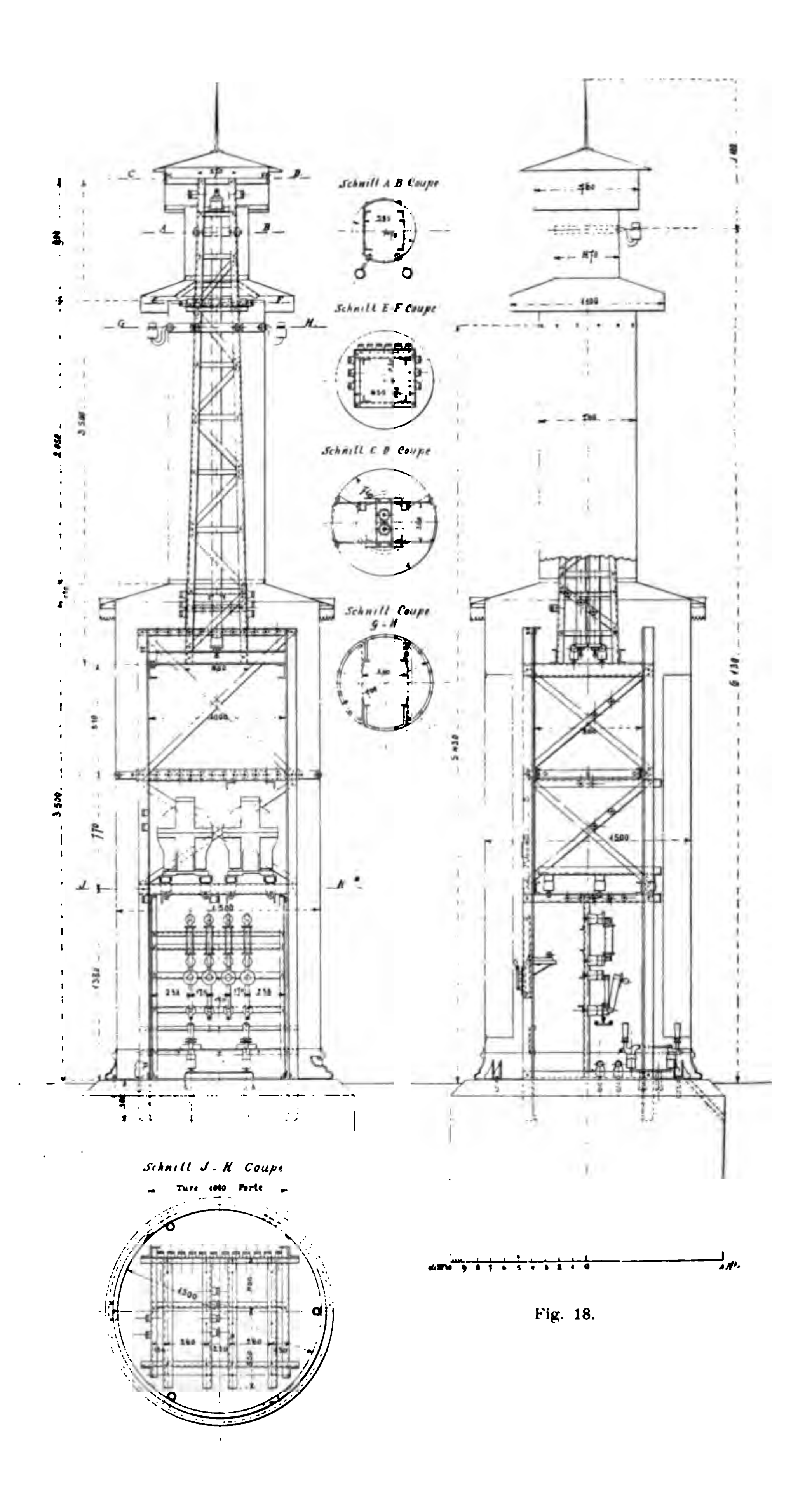
Fig. 17.

15. Schaltpulte.

Die Schaltpulte (Fig. 19) haben den Vorzug, dass der Schaltpultwärter beim Bedienen der Apparate den Maschinenraum vor sich hat und die Maschinen beobachten kann. Die Messinstrumente sind auf Säulen angebracht und können beim Regulieren der Widerstände und beim Parallelschalten von Maschinen leicht beobachtet werden.[2]) Die Schalter werden auf den schräg liegenden Marmortafeln untergebracht, während das Innere des Pultes Widerstände u. dergl. aufnehmen kann. Bei höheren Spannungen setzt man die Schalter vorteilhaft unter die Marmortafeln bezw. unter

1) Konstruktion der Maste siehe „Freileitungen" Hdb. VI, 2.

2) Eine eigenartige Konstruktion eines Schaltpultes zeigt Fig. 6, ETZ 1901, S. 6 Schaltanlage der Sächsischen Maschinenfabrik, Chemnitz.



Schnitt A B Coupe
Schnitt E F Coupe
Schnitt C D Coupe
Schnitt Coupe G - H
Schnitt J - K Coupe
Ture 1000 Porte
4500

Fig. 18.

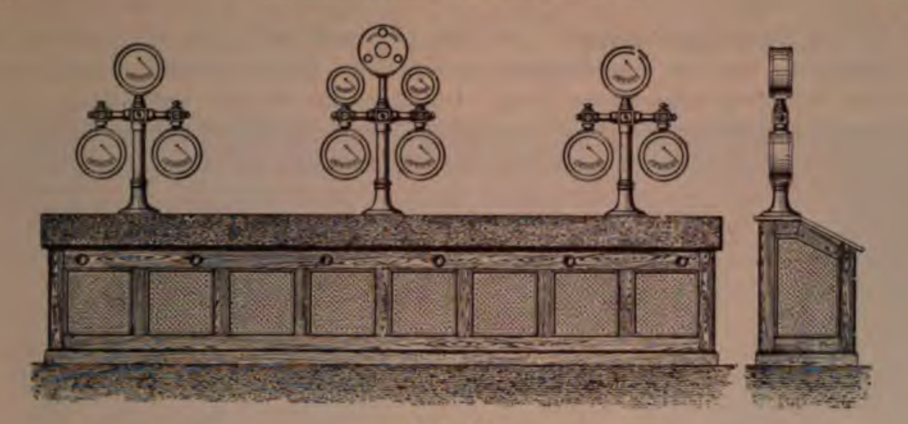


Fig. 19.

den Fussboden und lässt nur die Griffe herausragen, um beim Öffnen der Schalter nicht durch den Lichtbogen gefährdet zu werden.

Auch grössere Widerstände werden hinter den Pulten oder, falls die Schaltpulte erhöht aufgestellt sind, unter denselben angebracht und nur die Antriebsvorrichtungen auf den Pulten montiert. Die Übertragung der Bewegung geschieht durch Ketten oder Drahtseile. Die Verkleidung der horizontal und schräg liegenden Felder besteht aus Marmor, die der vertikalen Felder aus Eisenblech.

Indessen nehmen diese Schaltanlagen wesentlich mehr Platz ein als die anderen und da auch die konstruktive Durchführung nicht in allen Fällen leicht ist, werden sie nur selten angewendet. Bisweilen werden Schaltpulte auch in Verbindung mit Schalttafeln ausgeführt, um eine gedrängtere Anordnung der Apparate zu erreichen; als typisches Beispiel diene Fig. 22 a, eine von Voigt & Haeffner erbaute Hochspanspannungsschaltanlage.



Fig. 20.

16. Schaltschränke.

Wo nur Sicherungen und Schalter zusammengefasst werden, wie dies

z. B. bei Verteilungsleitungen der Fall ist, und wo zwar eine leichte Bedienbarkeit, aber ein ausreichender persönlicher Schutz vorhanden sein muss, finden Schaltschränke Anwendung. Die Apparate werden auf Eisengerüsten befestigt und diese mit einer eisernen Umkleidung vollständig umgeben, aus der nur die Schaltergriffe herausragen. Fig. 20 zeigt derartige Schaltschränke, welche in der von SIEMENS & HALSKE erbauten Zentrale in Turin Verwendung gefunden haben. Die vor den Sicherungen befindlichen Teile des Schrankes sind zu Thüren ausgebildet, so dass die Schmelzstreifen leicht erneuert werden können.

Eine andere Anordnung zeigen die auf Fig. 21 sichtbaren Schaltschränke, die in dem unter Tage belegenen Schaltraum eines Bergwerkes untergebracht sind.

Hochspannungs-Schaltanlagen, die auf mehrere Räume verteilt sind.

17. Einrichtung und Beispiele.

In Hochspannungsanlagen wurden ursprünglich dieselben Schalttafeln verwendet, die für Niederspannung üblich sind, nur mit dem Unterschied, dass die stromführenden zugänglichen Teile besser gegen Berührung geschützt waren und für bessere Isolierung gesorgt wurde. Indessen sind diese Anordnungen nicht sicher genug, um sie allgemeiner anzuwenden. Moderne Hochspannungs-Schaltanlagen sind in den letzten Jahren daher so ausgeführt worden, dass an dem eigentlichen Bedienungspunkt überhaupt nur Niederspannung vorhanden ist. Es wird dies dadurch erreicht, dass die Instrumente unter Zwischenschaltung von Messtransformatoren eingebaut und die Schalter durch mechanischen Antrieb in Tätigkeit gesetzt werden. Im übrigen sind sämtliche Hochspannung führenden Leitungen und Apparate in besonderen, teils unter, teils neben den Schaltbühnen belegenen Räumen untergebracht, die nur besonders instruiertem Personal zugänglich sind. Die Schaltbühne selbst kann sowohl Schalttafeln, Schaltpulte als auch Schaltsäulen erhalten.

Fig. 22 zeigt die gesamte Apparatenanlage in der Umformerstation „Monbijou“ des Elektrizitätswerkes der Stadt Bern, erbaut von der Maschinenfabrik Örlikon, und Fig. 22a eine von VOIGT & HAEFFNER erbaute Schaltanlage für Hochspannung. (Siehe auch Fig. 3.)

Die Verlegung von Leitungen an Schalttafeln.[1])

18. Leitungsmaterial an Schalttafeln.

Da Schalttafeln zumeist in elektrischen Betriebsräumen aufgestellt werden, welche nur instruiertem Personal zugänglich sind, so wird für die Stromführung an denselben in den meisten Fällen blanke Leitung in Form von Rund- und Flachkupfer verwendet. An Stelle des Kupfers tritt häufig, wenn die Strombelastung nicht allzu grosse Querschnitte erforderlich macht, Messing. Bei der Verlegung dieser Leitungen ist es nicht immer möglich, genügend grosse gegenseitige Abstände innezuhalten, da an den Schalttafeln, als den zentralen Verteilungspunkten, mitunter sehr viele Leitungen zusammenlaufen, welche in einem beschränkten Raum untergebracht werden müssen.

19. Anordnung der Leitungen.

Aus diesem Grunde ist es aber auch erforderlich, Leitungskreuzungen soviel wie möglich zu vermeiden und die Disposition der Schalttafel und der abgehenden Leitungen so zu treffen, dass Kreuzungen nur in den aller-

1) Vgl. Fig. 8, 16 u. 24.



Fig. 21.

zwingendsten Fällen vorkommen. Wenn sie aber vorhanden sind, so muss zwischen den kreuzenden Leitungen ein solcher Abstand innegehalten werden, dass bei der in Frage kommenden Spannung ein Überschlagen des Stromes ausgeschlossen ist, oder die kreuzenden Leitungen sind durch Isolierstücke derart voneinander zu trennen, dass sie nicht zusammenschlagen können. Bedingung hierfür ist, dass die Leitungen an den Trennstücken sicher befestigt werden. Bei niedrigen Spannungen genügt das Überschieben von Hartgummirohr, welches jedoch an der Leitung mit Isolierband befestigt werden muss. Bei höheren Spannungen müssen diesen angemessene Isoliermittel in geeigneten Formen Verwendung finden. Über weitere Anordnungen kreuzender Leitungen vgl. das Kapitel „Leitungsverlegung" dieses Bandes.

Da an Schalttafeln vielfach Apparate montiert werden, wie Sicherungen, Maximalausschalter, bei denen betriebsmässig Feuererscheinungen auftreten, so ist bei der Verlegung von Leitungen darauf zu achten, dass sie nie in eine solche Nähe dieser Apparate gelangen, in welcher sie bei deren Funktionieren in Mitleidenschaft gezogen werden könnten. Insbesondere bei Blitzableitern oder Hochspannungsausschaltern sind, wenn sie in Thätigkeit treten, lange Stichflammen keine Seltenheit; an diesen dürfen daher in der Richtung der Stichflammen die Leitungen nur in Entfernungen von 50 bis 75 cm vorbeigeführt werden.

In solchen Zentralen, welche gleichzeitig Gleichstrom und Wechselstrom abgeben, werden, wenn sie nicht grösseren Umfanges sind, häufig Schalttafeln verwendet, an welchen gleichzeitig Leitungen für beide Stromarten verlegt sind. Hier muss in erhöhtem Masse dafür gesorgt werden, dass sich die verschiedenen Leitungen nicht berühren und man thut gut, die Leitungsanlage so zu disponieren, dass die eine Hälfte der Tafel nur für Gleichstrom, die andere nur für Wechselstrom bestimmt ist.[1])

Wenn Schalttafeln auf der Rückseite zugänglich sind, so sind die Leitungen derart anzuordnen, dass beim Einsetzen von Sicherungen u. s. w. durch die blanken Leitungen keine erhöhte Gefahr für die bedienenden Personen herbeigeführt wird.

Wenn auf der der Schalttafelrückseite gegenüberliegenden Wand Apparate und ungeschützte stromführende Teile in erreichbarer Höhe montiert sind, so dass von der Schalttafel nach der gegenüberliegenden Wand Leitungen geführt werden müssen, so sind dieselben so hoch zu verlegen, dass ein aufrechtgehender Mensch die Leitungen mit dem Kopf nicht berühren kann; als Mindestabstand vom Fussboden werden somit etwa 2 m erforderlich sein.

20. Leitungsverbindungen.

Die Verbindungsstellen an Schalttafelleitungen,[2]) die mitunter ganz beträchtlich hohe Ströme führen, sind sorgfältiger als jede andere herzustellen. Insbesondere gilt dies bei der Verlegung von Schienen. Für diese war es früher üblich, dass sie übereinander gestossen und nach Zwischenlegung einer Schicht Stanniol verschraubt wurden, um einen innigen Kontakt zu erzielen. Diese Art der Verbindung stellte sich jedoch als unzweckmässig, sogar gefährlich heraus, so dass als Folge derselben Schaltbrettbrände und ausnahmsweise intensive Kurzschlüsse auftraten. Der Grund lag darin, dass die Schienen nicht gut aufeinander passten; sie wurden schlecht verlegt, so

---

1) Über Vorrichtungen, welche den Übertritt von Hochspannung in Niederspannungskreise unschädlich machen, vgl. Hdb. VI, 1 (Spannungssicherungen).

2) Die Verbindung von Kabeln und Leitungen siehe S. 38 u. f.

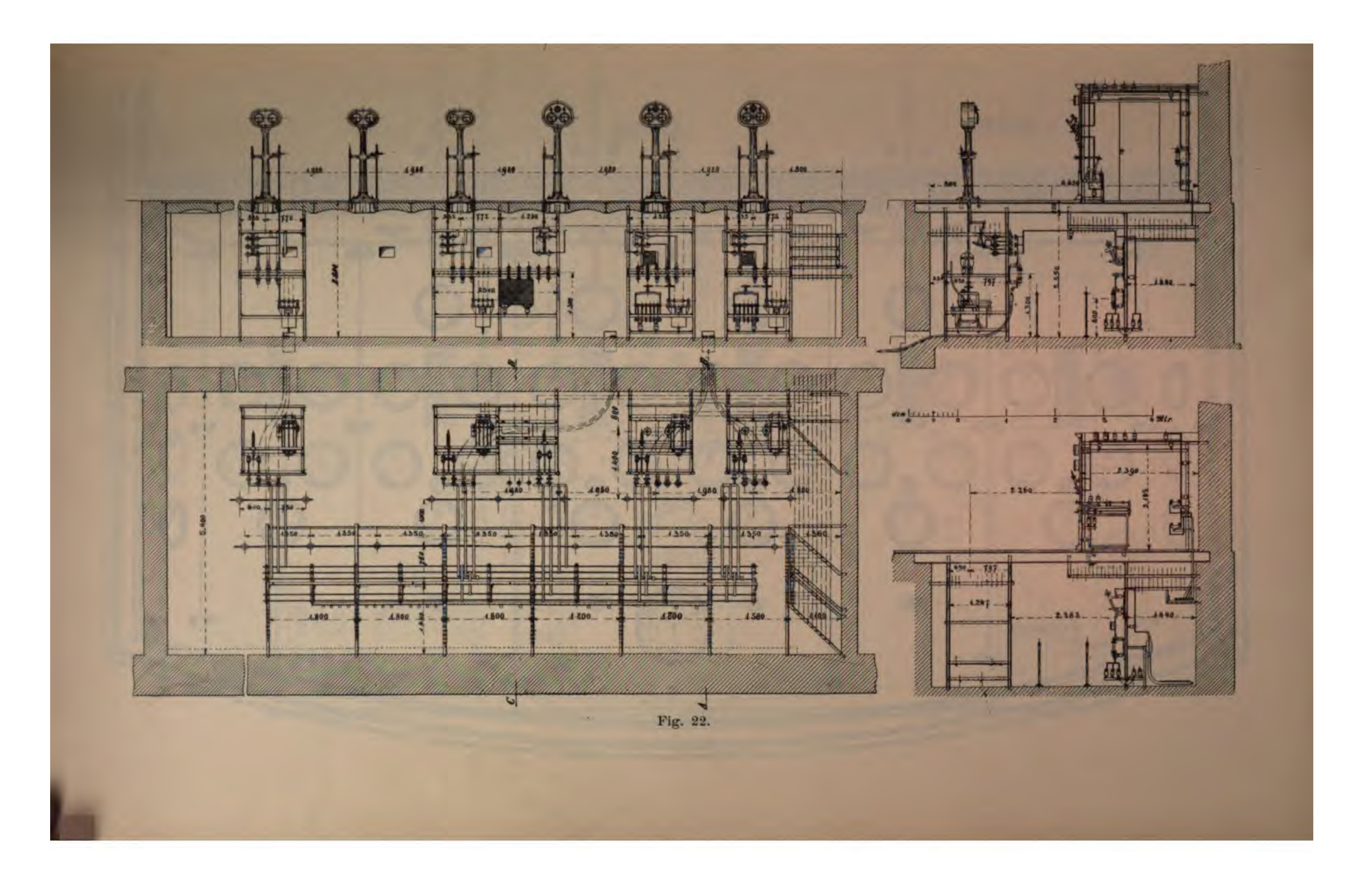
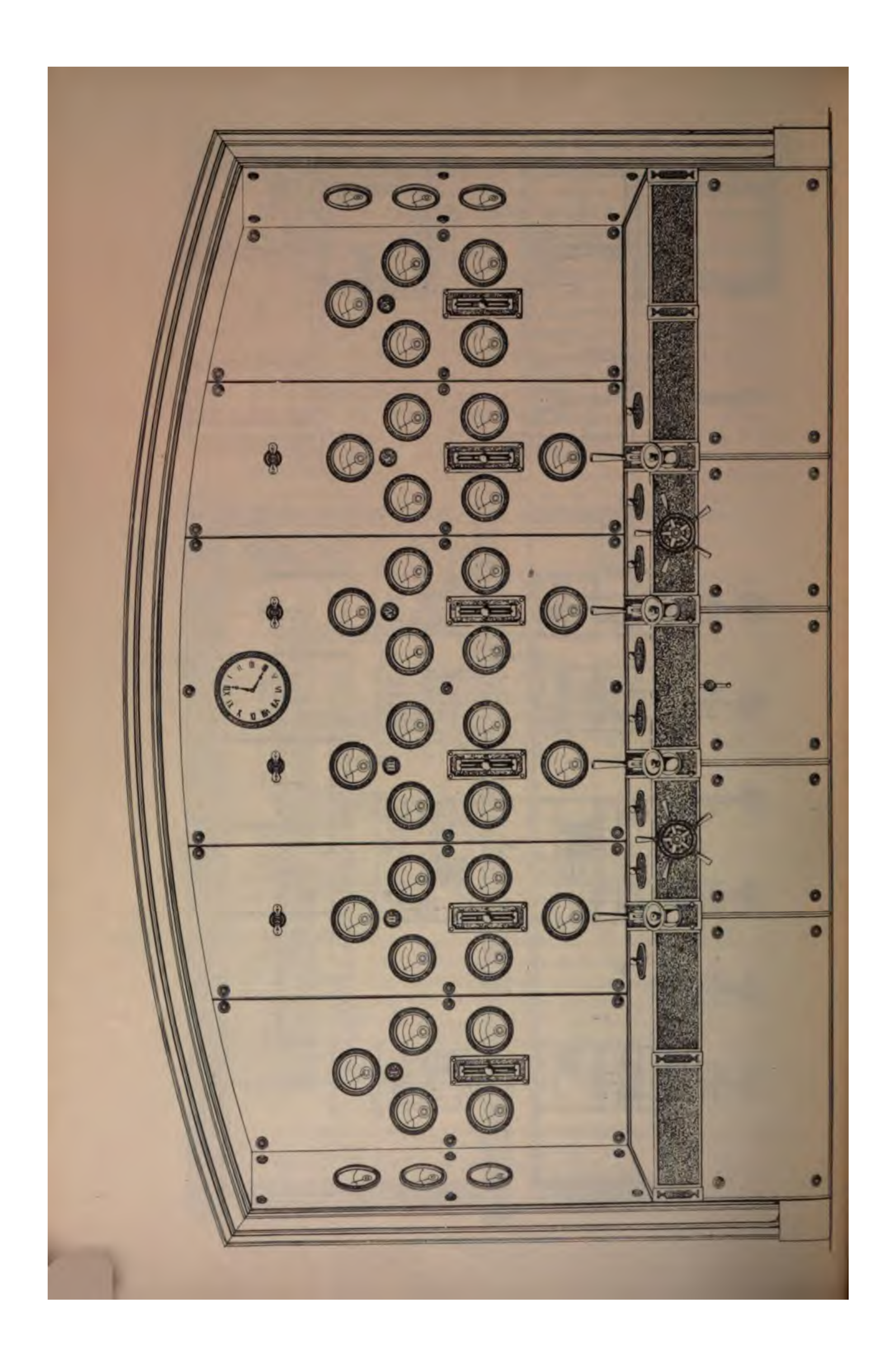


Fig. 22.



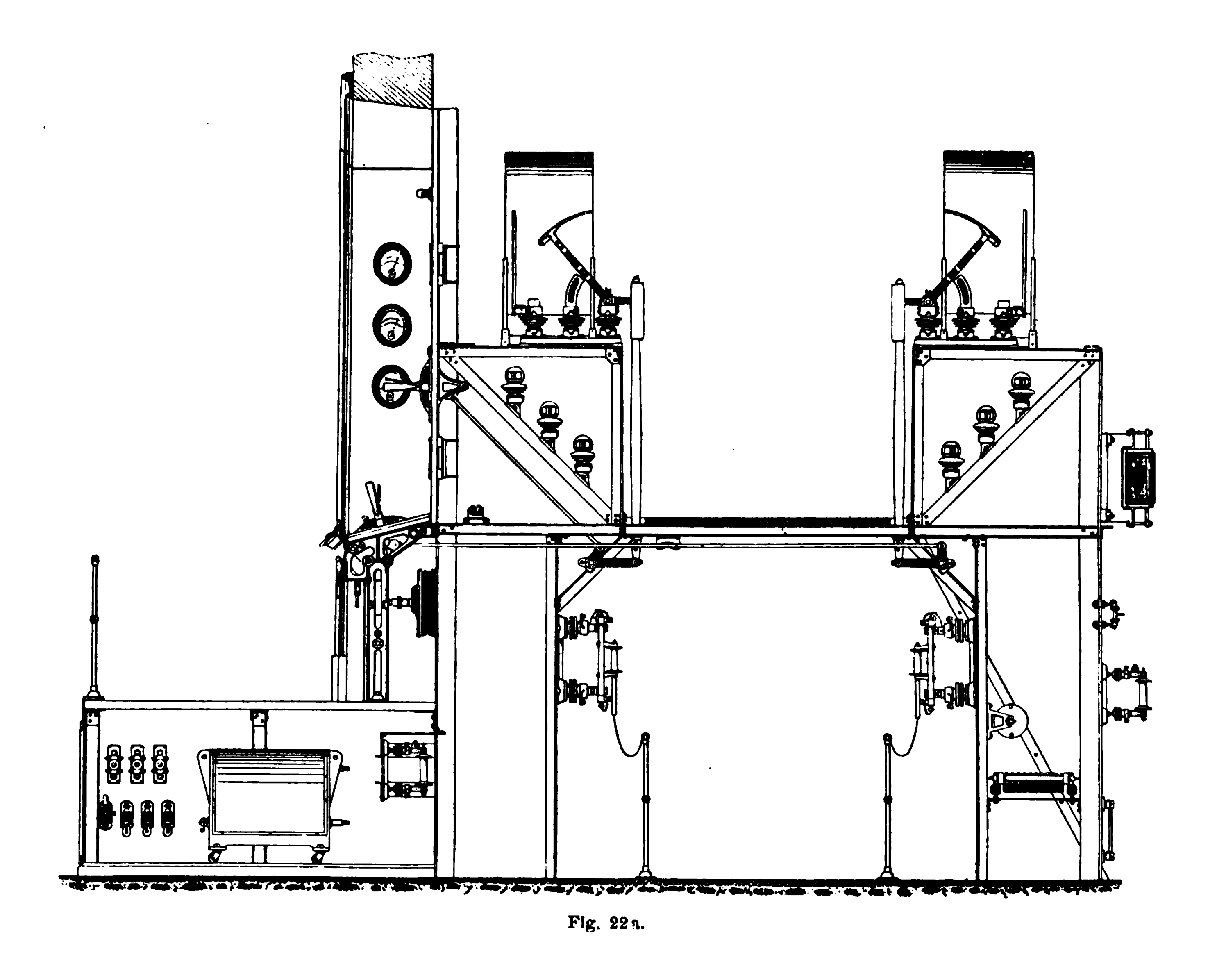


Fig. 22a.

dass die Schienenseiten erst durch die Verbindungsbolzen gewaltsam zusammengeholt werden mussten. Der Monteur fühlte sich auch nicht berufen, die rohen Schienen besonders nachzuarbeiten, da das zwischengelegte Stanniol alle Unebenheiten ausgleichen sollte.[1] Es bestand somit von vornherein ein schlechter Kontakt. Gesetzt aber selbst den Fall, die Schienen werden gut aneinander gepasst, so bedingen die häufigen Temperaturwechsel der Schienen bei Belastungsänderungen, dass die Verbindungsschrauben gelockert und die Verbindung sich weniger innig gestaltet. Die Verbindungsstelle erwärmt sich, das leicht flüssige Stanniol schmilzt heraus und nunmehr wird der Kontakt nahezu aufgehoben und der Widerstand an der Verbindungsstelle so gross, dass Bolzen und Schiene glühend werden. Es ist somit erforderlich, Schienenverbindungen so gut als irgend möglich ohne Zwischenlage zusammenzupassen, so dass sich die Schienen innig berühren. Die Stossstellen sind gut zu verzinnen. Allerdings können auch an solchen gut hergestellten Verbindungen die Schrauben sich infolge wechselnder Erwärmung lockern und ist es daher Sache der Betriebsleitungen, dafür zu sorgen, dass an allen Schalttafeln die Verbindungsbolzen ab und zu nachgezogen werden. Um Fehler an Schalttafeln auf ihren Herd zu beschränken, können Trennschalter (siehe diese Hdb. VI, 1) in die Sammelschienen eingebaut werden, die auch bei der Vornahme von Arbeiten an der Schalttafel gute Dienste leisten.



Fig. 23.

21. Verlegung von Kupferschienen.

Die Verlegung von Kupferschienen erfolgt, wenn es sich um Spannungen unter 250 Volt handelt, ausser auf Glockenisolatoren vielfach auf den in Fig. 23 abgebildeten Schienenklammern, die der Anzahl der Leitungen entsprechend auf einen eisernen Bolzen nacheinander aufgereiht werden. Die Leitungen werden möglichst alle Meter unterstützt, jedoch ist es zweckdienlich, um ein Zusammenschlagen zwischen den Befestigungsstellen zu vermeiden, die Schienen noch durch besondere Distanzklemmen voneinander fern zu halten (besonders wichtig bei Zellenschalterleitungen).

Um ein bequemes Anschliessen der Leitungen zu ermöglichen, insbesondere um Kröpfungen starker Leitungen zu vermeiden, werden an kleineren Tafeln die Sammelschienen stufenförmig angeordnet; zu einer derartigen Befestigung dienen dann in der Regel stufenförmige Gusskörper (Fig. 23a), in welche Porzellanisolierdübel eingekittet werden. Auf ihnen werden dann die Kupferschienen festgeschraubt (SIEMENS-SCHUCKERT-Werke).

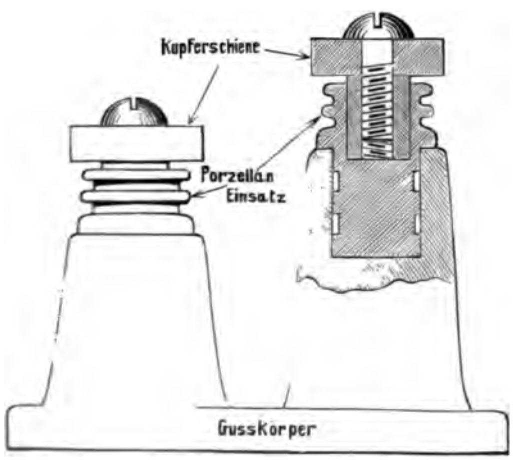


Fig. 23a.

Für Spannungen über 250 Volt werden stets Isolatoren verwendet, auf deren Kopf gusseiserne Kappen festgekittet werden, in deren schlitzförmige Aussparung die Kupferschiene gelegt wird (Fig. 24,

[1] POHL, Die Montage elektrischer Licht- und Kraftanlagen, Hannover 1903.

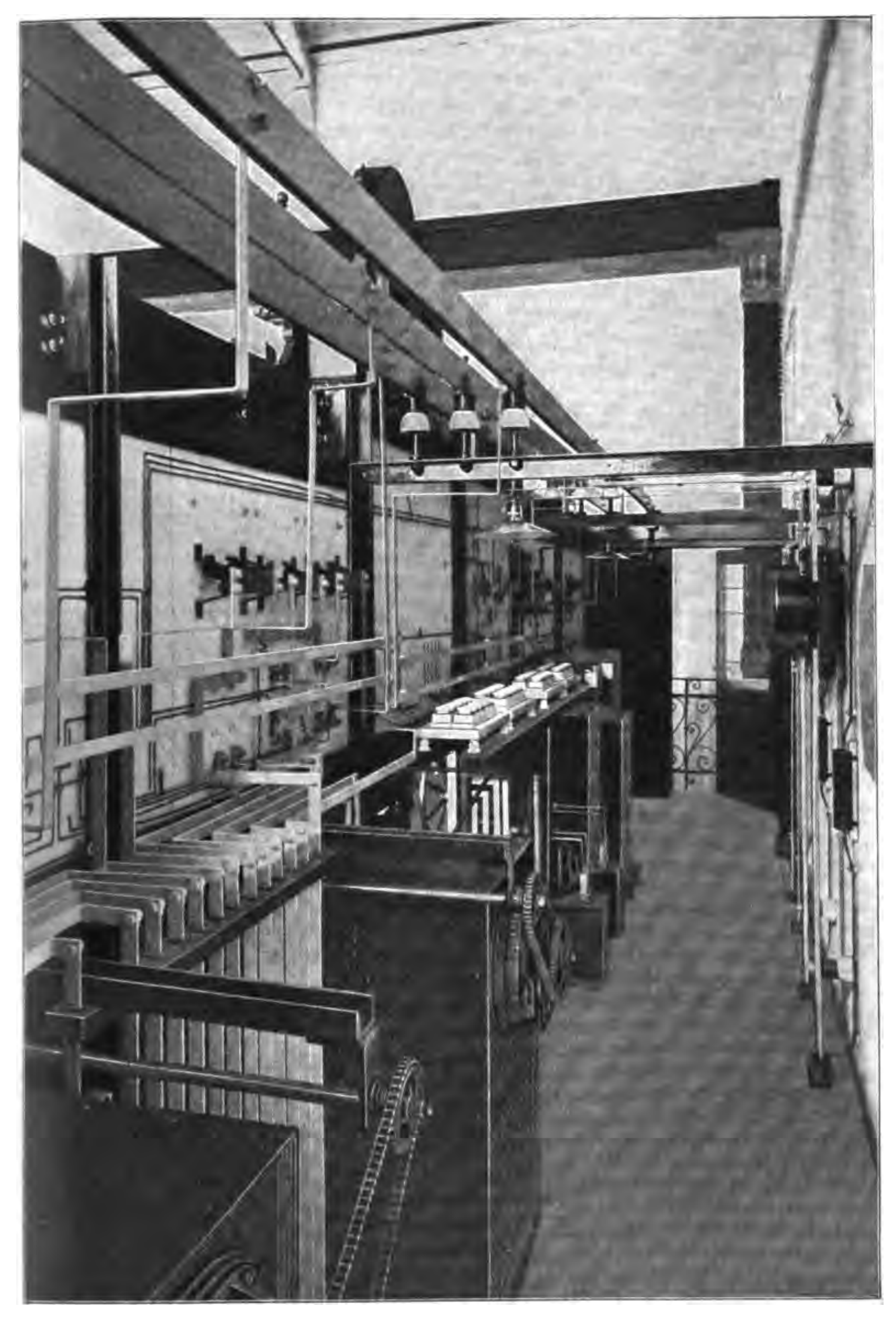


Fig. 24.

Schaltbrett der Zentrale in Bonn). In Fig. 25 wird ein Schienenisolator von LAHMEYER & Co. wiedergegeben, der sich sehr vorteilhaft verwenden lässt.

Bei grossen Zentralen werden häufig sehr viel Kupferschienen verwendet und ist es daher erforderlich, um die Arbeiten zu fördern, Schienenbiegevorrichtung und Lochstanzen zur Stelle zu haben.

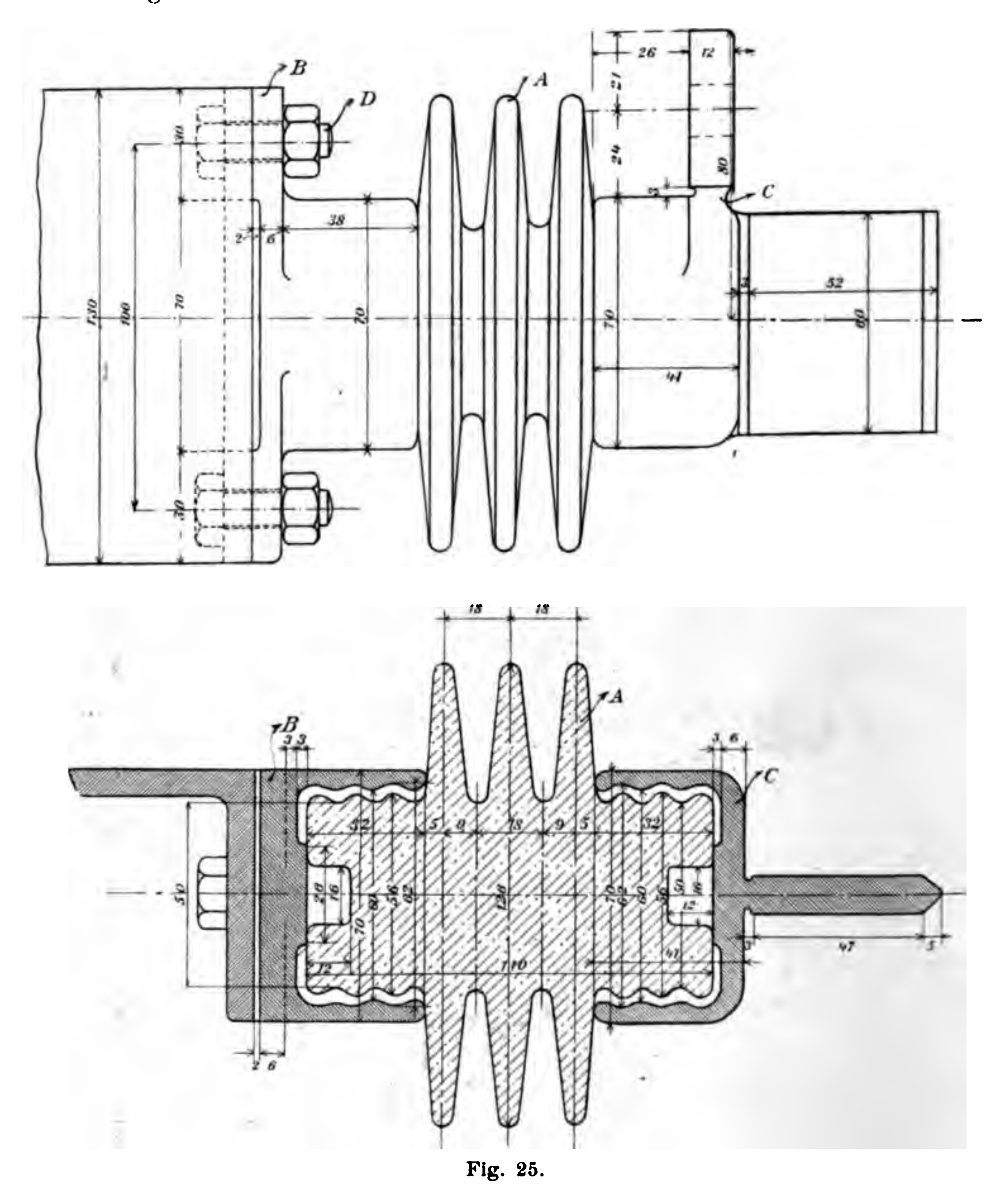


Fig. 25.

In den Fällen, wo Akkumulatorenbatterien verwendet werden und die Zellenschalter auf der Schalttafel montiert sind, muss die Anordnung dieser so getroffen werden, dass für die grosse Anzahl der Zellenschalterleitungen ein möglichst kurzer Weg gewählt werden kann.

Damit man sich über die Polarität oder Phase der hinter einer Schalttafel liegenden Leitung schnell zu orientieren vermag, werden sie durch ver-

schiedene Farben kenntlich gemacht, und zwar ist die allgemeine Anordnung die, dass der positive Pol rot, der negative Pol grau und der Nullleiter bei Dreileiteranlagen schwarz angestrichen wird. Neuerdings ist man jedoch bemüht, die Farben anders zu wählen, und zwar pflegt man den negativen Pol rot anzustreichen, da bei der Bestimmung der Polarität mit dem meist verwendeten WILKEschen Polreagenzpapier am negativen Pol ein roter Fleck erscheint. Werden an einer Schalttafel Leitungen für Gleich- und Wechselstrom verlegt, so werden für Gleichstrom die genannten Farben beibehalten, für Wechselstrom irgendwelche anderen auffallenden Farben, etwa hellgrün, gewählt.

22. Verbindungsleitungen zwischen den Apparaten.

Für die Verbindung der auf einer Schalttafel montierten Apparate können, sofern die Platten aus Marmor bestehen, Kupferschienen verwendet werden, welche auf dem Marmor direkt aufgeschraubt sind (Fig. 24). Es empfiehlt sich jedoch, dann die Rückseite der Schalttafel ebenfalls zu polieren oder mit einem feuchtigkeitsbeständigen Lack zu überstreichen, um Oberflächenleitung möglichst zu vermeiden.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass die früher übliche Konstruktion der Apparate bedingte, dass die Kupferschienen von oft recht beträchtlichem Querschnitt durch die Platten hindurchgeführt werden mussten, um sie anzuschliessen. Hierzu waren rechteckige Aussparungen in den Marmorplatten erforderlich, welche grosse Kosten verursachten.

Hierin ist ein grosser Wandel dadurch geschaffen worden, dass für Wechselstrominstrumente Stromtransformatoren verwendet werden, von denen aus dünne Leitungen durch die Platten zu den Instrumenten führen und infolgedessen nur ein kleines rundes Loch ausgebohrt werden muss. Bei Gleichstrominstrumenten wird ein Nebenschluss in die Kupferschiene hinter der Schalttafel eingeschaltet und nur die Spannungsleitungen führen zum Instrument. Durch diese Anordnungen wird auch die Montage wesentlich erleichtert und die Leitungsanordnung übersichtlicher.

Pläne und Schaltungszeichnungen.

23. Bezeichnungen auf den Plänen.

Um über jede Anlage ein genaues Bild zu besitzen, werden nach der Fertigstellung genaue Pläne und Zeichnungen der Schaltung hergestellt. Hierzu werden in der Regel die Pläne benutzt, die bei der Projektierung hergestellt wurden, nur müssen diese genau kontrolliert werden, da sich während des Baues stets Änderungen ergeben. In die Pläne sind die Querschnitte der Hauptleitungen, Lage der Kabel und Leitungen, Art der Verlegung u. s. w. einzutragen und damit diese Eintragungen möglichst einheitlich erfolgen, hat der Verband Deutscher Elektrotechniker bestimmte Bezeichnungen festgelegt, die im nachfolgenden wiedergegeben sind.

Der Plan[1]) soll enthalten:

a) Bezeichnung der Räume nach Lage und Verwendung. Besonders hervorzuheben sind feuchte oder durchtränkte Räume und solche, in welchen ätzende oder leicht entzündliche Stoffe oder explosible Gase vorkommen.

Zusatz für Hochspannung:

Für Fernleitungen und Leitungsnetze muss die Lage der Unterstationen, Transformatoren, Hausanschlüsse, Streckenausschalter, Sicherungen und Blitzschutzvorrichtungen angegeben sein.

1) § 1 der Sicherheitsvorschriften.

b) Lage, Querschnitt und Isolierungsart der Leitungen. Der Querschnitt wird, in Quadratmillimetern ausgedrückt, neben die Leitungslinien gesetzt. Die Isolierungsart wird durch die unten angeführten Buchstaben bezeichnet.
c) Art der Verlegung (Isolierglocken, Rollen, Ringe, Rohre u. s. w.) und Art des Schutzes; hierfür sind ebenfalls nachstehend Bezeichnungen angegeben.
d) Lage der Apparate und Sicherungen.
e) Lage und Art der Lampen, Elektromotoren und sonstigen Stromverbraucher.

Zusatz für Hochspannung:

f) Für die Verbrauchsstellen müssen Pläne verwendet sein, auf welche ein grosser roter Blitzpfeil eingezeichnet ist und die Spannungen vermerkt sind.

Sind in einem Plan Hoch- und Niederspannungsleitungen eingezeichnet, so sind die Hochspannungsleitungen mindestens am Anfang und Ende durch Blitzpfeil zu kennzeichnen.

g) Sämtliche im Plan eingezeichneten Stangen müssen mit ihren Nummern bezeichnet sein.

× = Feste Glühlampe.

∿× = Bewegliche Glühlampe.

⊗ 5 = Fester Lampenträger mit Lampenzahl (5).

3 ∿⊗ = Beweglicher Lampenträger mit Lampenzahl (3).

Obige Zeichen gelten für Glühlampen jeder Kerzenstärke, sowie für Fassungen mit und ohne Hahn.

◎ 6 = Bogenlampe mit Angabe der Stromstärke (6 Amp.).

◎ 6 D = Dauerbrandlampe mit Angabe der Stromstärke (6 Amp.).

10 = Dynamomaschine bezw. Elektromotor jeder Stromart mit Angabe der höchsten zulässigen Beanspruchung in Kilowatt.

= Akkumulatoren.

)– 6 = Wandfassung, Anschlussdose mit Angabe der Stromstärke (6 Amp.).

6 6 6 = Einpoliger, bezw. zweipoliger, bezw. dreipoliger Ausschalter mit Angabe der höchsten zulässigen Stromstärke (6 Amp.).

3 = Umschalter, desgl.

= Sicherung (an der Abzweigstelle).

⊠ 10 = Widerstand, Heizapparate u. dergl. mit Angabe der höchsten zulässigen Stromstärke (10 Amp.).

∿⊠ 10 = Desgl., beweglich angeschlossen.

7·5 = Transformator mit Angabe der Leistung in Kilowatt (7·5).

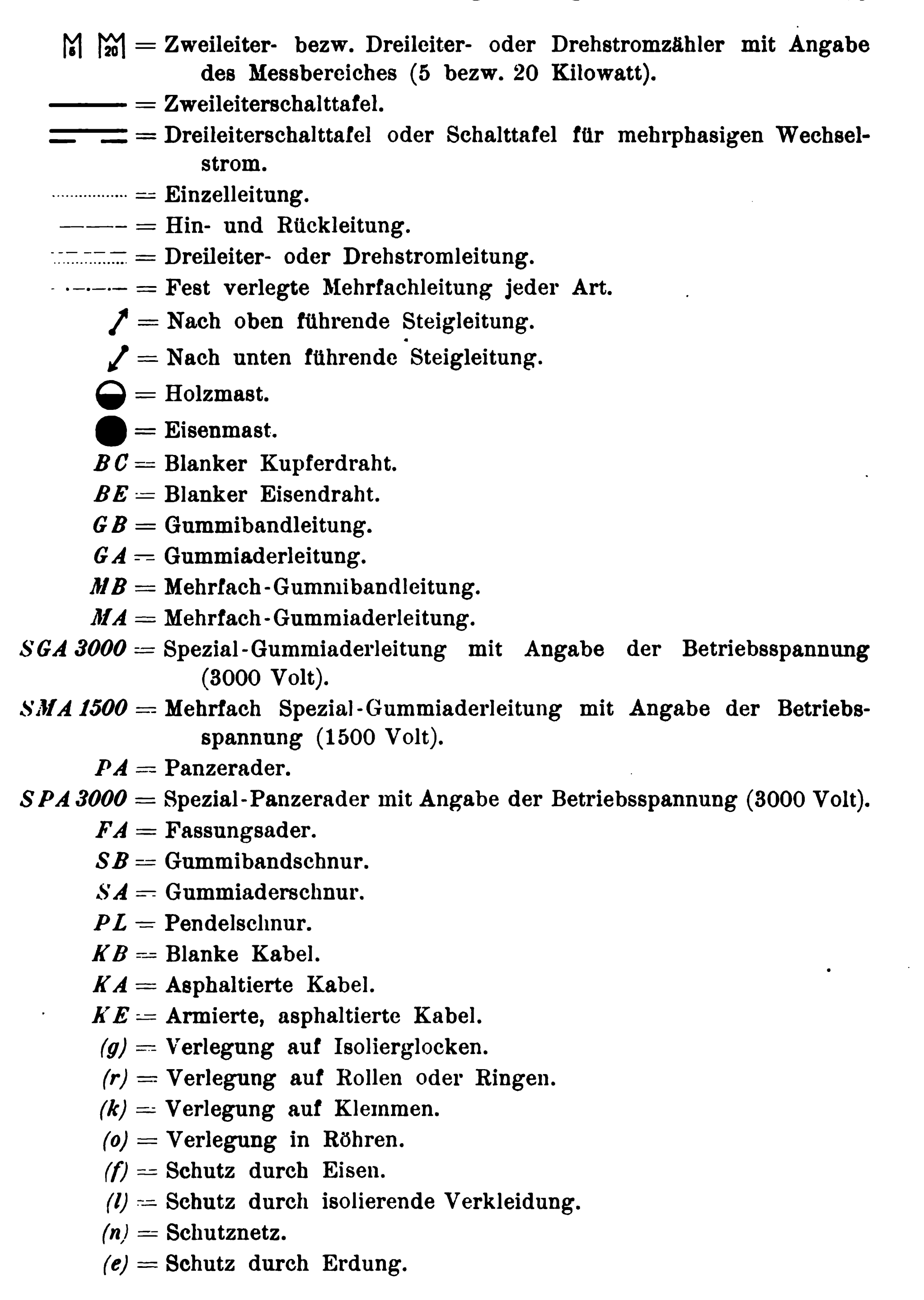
= Drosselspule.

= Blitzschutzvorrichtung.

→ ← = Spannungssicherung.

= Erdung.

= Blitzpfeil.



[5] [20] = Zweileiter- bezw. Dreileiter- oder Drehstromzähler mit Angabe des Messbereiches (5 bezw. 20 Kilowatt).

= Zweileiterschalttafel.

= Dreileiterschalttafel oder Schalttafel für mehrphasigen Wechselstrom.

= Einzelleitung.

= Hin- und Rückleitung.

= Dreileiter- oder Drehstromleitung.

= Fest verlegte Mehrfachleitung jeder Art.

= Nach oben führende Steigleitung.

= Nach unten führende Steigleitung.

= Holzmast.

= Eisenmast.

BC = Blanker Kupferdraht.

BE = Blanker Eisendraht.

GB = Gummibandleitung.

GA = Gummiaderleitung.

MB = Mehrfach-Gummibandleitung.

MA = Mehrfach-Gummiaderleitung.

SGA 3000 = Spezial-Gummiaderleitung mit Angabe der Betriebsspannung (3000 Volt).

SMA 1500 = Mehrfach Spezial-Gummiaderleitung mit Angabe der Betriebsspannung (1500 Volt).

PA = Panzerader.

SPA 3000 = Spezial-Panzerader mit Angabe der Betriebsspannung (3000 Volt).

FA = Fassungsader.

SB = Gummibandschnur.

SA = Gummiaderschnur.

PL = Pendelschnur.

KB = Blanke Kabel.

KA = Asphaltierte Kabel.

KE = Armierte, asphaltierte Kabel.

(g) = Verlegung auf Isolierglocken.

(r) = Verlegung auf Rollen oder Ringen.

(k) = Verlegung auf Klemmen.

(o) = Verlegung in Röhren.

(f) = Schutz durch Eisen.

(l) = Schutz durch isolierende Verkleidung.

(n) = Schutznetz.

(e) = Schutz durch Erdung.

24. Beispiele eines Planes und eines Schaltungsschemas.

Um zu zeigen, in welcher Art die im Vorhergesagten geforderten Pläne und Schaltungen ausgeführt sein müssen, sind zwei Beispiele angegeben: ein Installationsplan (Fig. 26) und das Schaltungsschema der Kraft- und Lichtverteilungsanlage Wangen i. Allgäu (Fig. 27), erbaut von Örlikon.

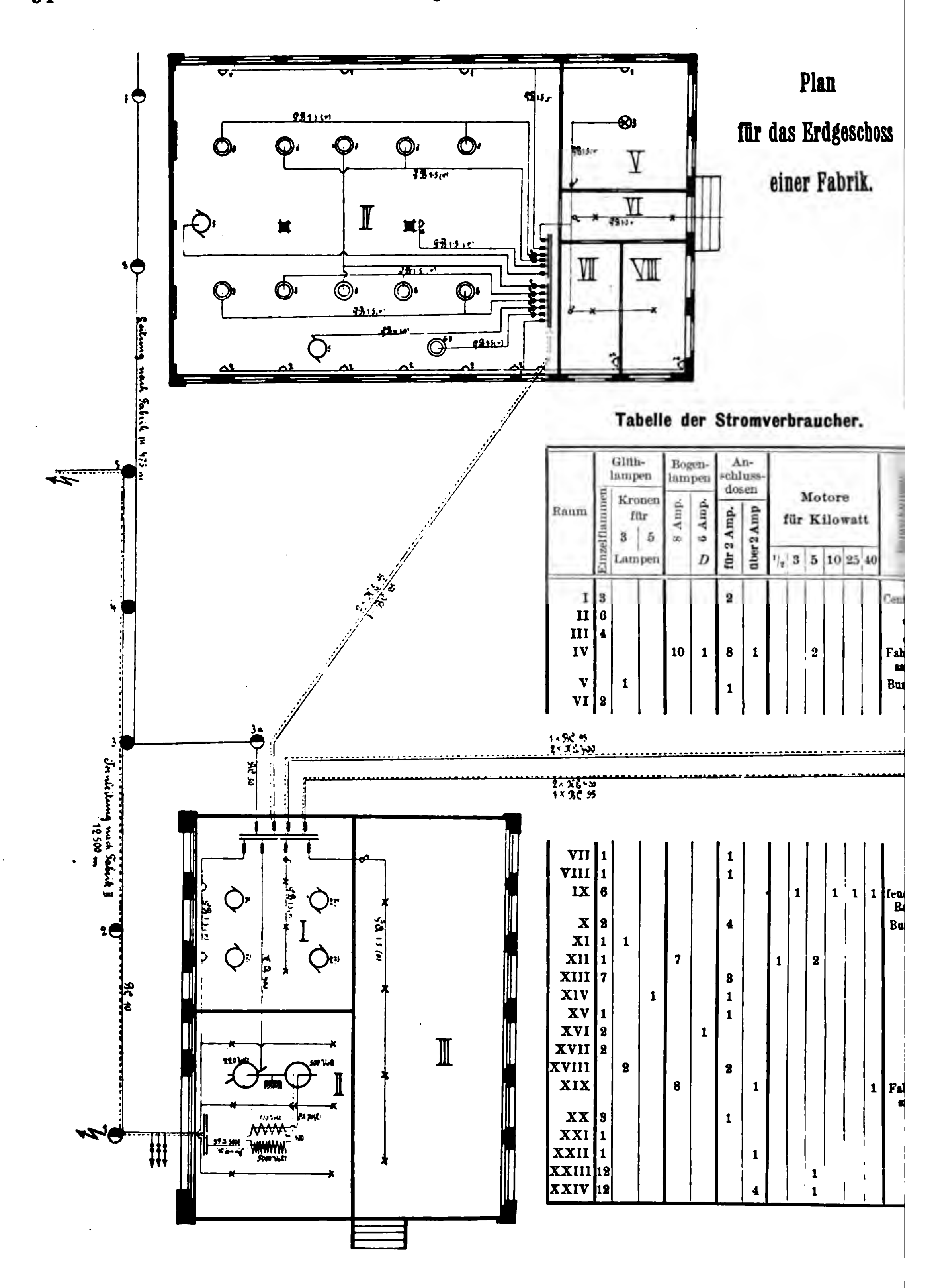
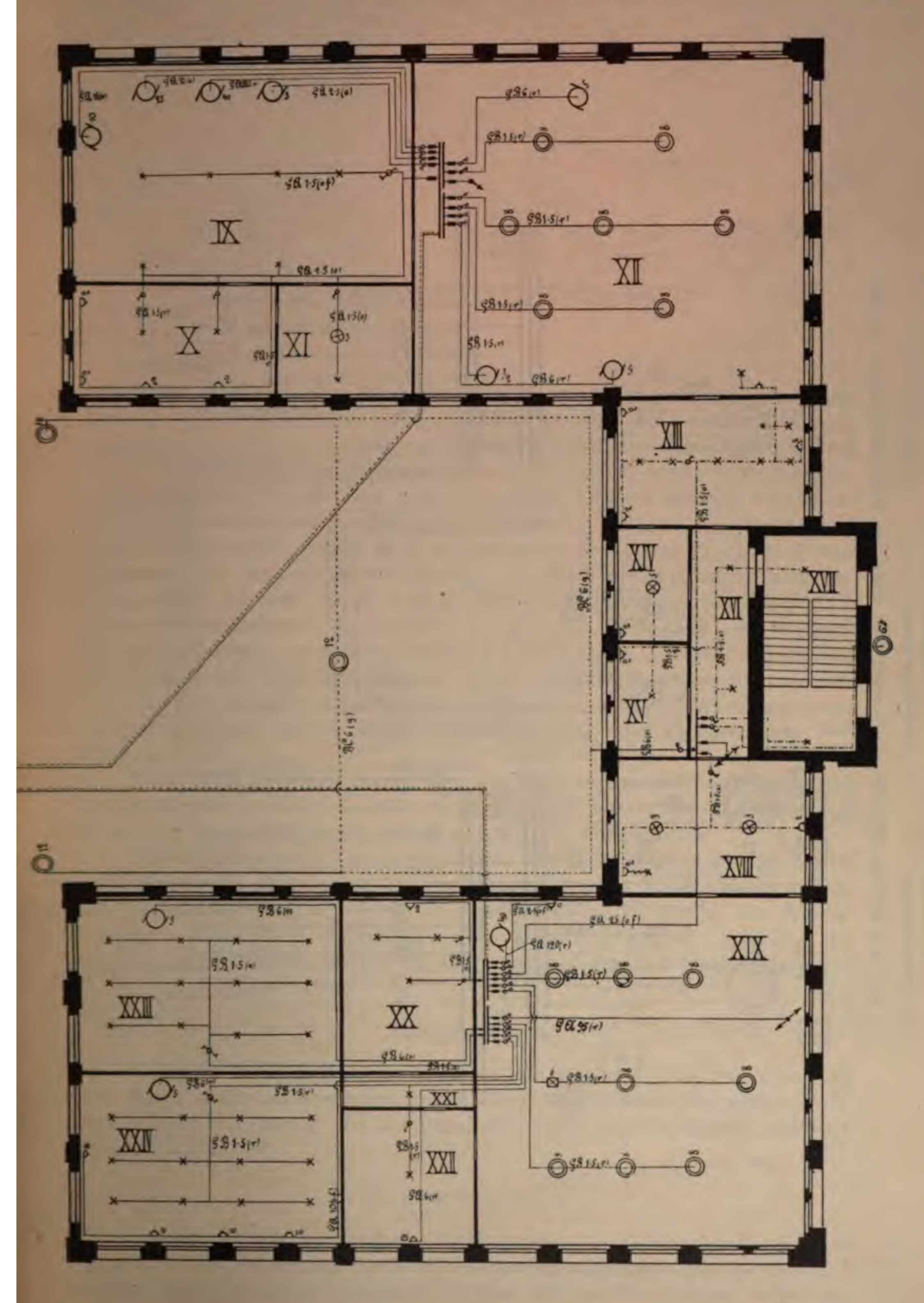


Tabelle der Stromverbraucher.

Raum	Glühlampen: Einzelflammen	Glühlampen: Kronen für 3 Lampen	Glühlampen: Kronen für 5 Lampen	Bogenlampen: 8 Amp.	Bogenlampen: 6 Amp. D	Anschlussdosen: für 2 Amp.	Anschlussdosen: über 2 Amp	Motore für Kilowatt: ½	3	5	10	25	40	
I	3					2								Cen
II	6													
III	4													
IV				10	1	8	1			2				Fab sa
V		1				1								Bu
VI	2													
VII	1					1								
VIII	1					1								
IX	6								1		1	1	1	feu B
X	2					4								Bu
XI	1	1												
XII	1			7				1		2				
XIII	7					3								
XIV			1			1								
XV	1					1								
XVI	2				1									
XVII	2													
XVIII		2				2								
XIX				8			1						1	Fa
XX	3					1								
XXI	1													
XXII	1						1							
XXIII	12									1				
XXIV	12						4			1				


IX
X
XI
XII
XIII
XIV
XV
XVI
XVII
XVIII
XIX
XX
XXI
XXII
XXIII
XXIV

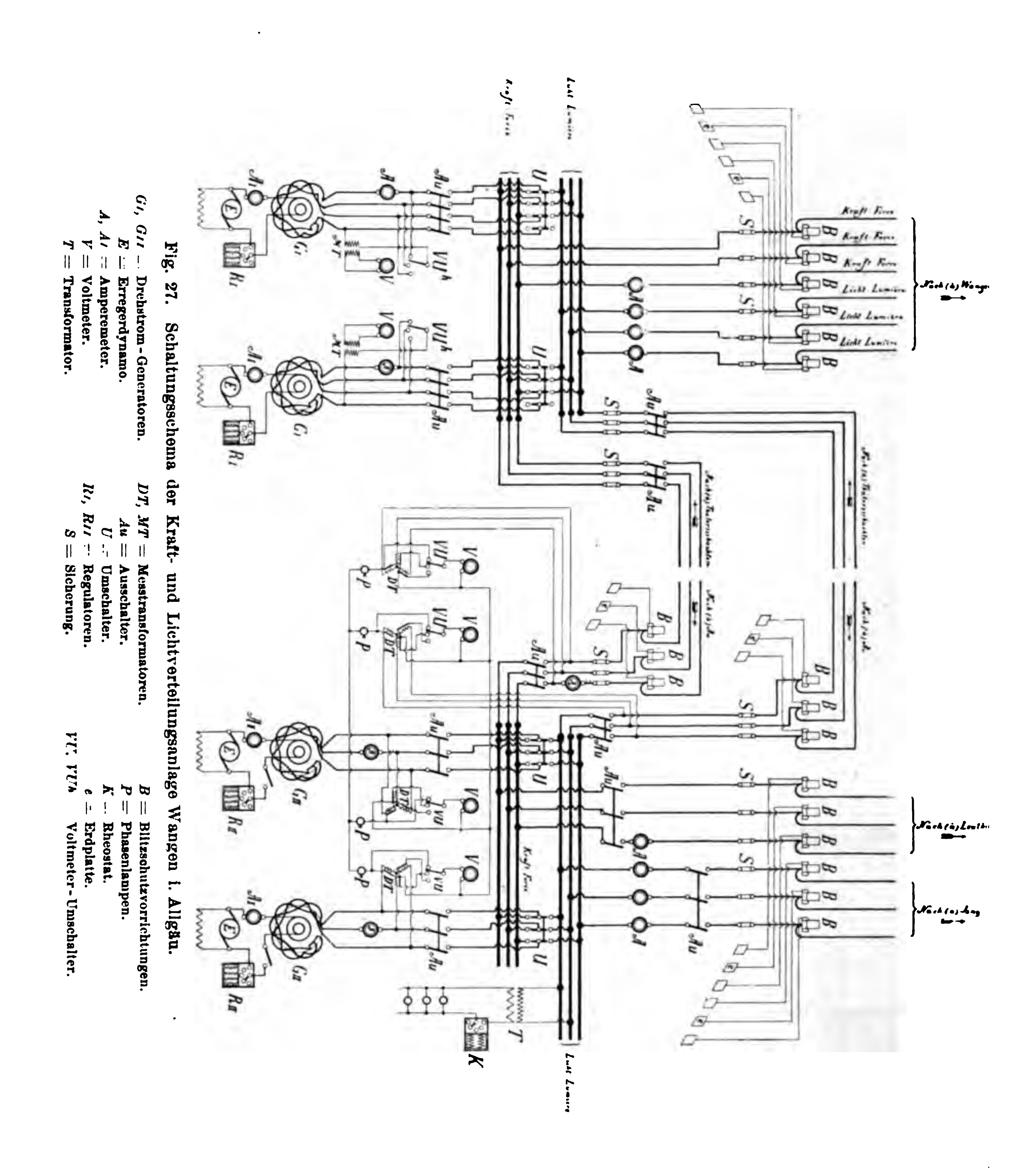


Fig. 27. Schaltungsschema der Kraft- und Lichtverteilungsanlage Wangen i. Allgäu.

G_I, G_{II} = Drehstrom-Generatoren.
E = Erregerdynamo.
A, A_I = Amperemeter.
V = Voltmeter.
T = Transformator.
DT, MT = Messtransformatoren.
Au = Ausschalter.
U = Umschalter.
R_I, R_{II} = Regulatoren.
S = Sicherung.
B = Blitzschutzvorrichtungen.
P = Phasenlampen.
K = Rheostat.
e = Erdplatte.
VU, VU^h Voltmeter-Umschalter.

Die Leitungsverbindungen.

25. Allgemeines über Leitungsverbindungen.

Wenn man von den dünnsten Drähten und Seilen absieht, muss jede Leitung ein vermittelndes Glied erhalten, welches den Anschluss an die Apparate oder die Verbindung zwischen zwei Leitungen ermöglicht. In dem letzteren Falle kann das Verbindungsstück wegfallen, wenn es sich um Installationsdrähte handelt, die gut miteinander verlötet werden. Alle Verbindungsstellen müssen nicht nur eine vorzüglich leitende Vereinigung herstellen, sondern sie müssen auch so beschaffen sein, dass Feuchtigkeit und chemische oder atmosphärische Einflüsse die Güte der Verbindung nicht beeinträchtigen können. Dass mechanische Beanspruchungen unschädlich gemacht werden müssen, sei es durch die Art der Verbindung, sei es durch die der Verlegung, ist selbstverständlich; indessen ist z. B. bei unterirdisch verlegten Kabeln und Freileitungen dieser Umstand besonders zu beachten.

Die Verbindung von Leitungen untereinander, sowie die Abzweigung von solchen geschieht mittels Lötung, Verschraubung oder gleichwertiger Verbindung.

Diese Stellen müssen ebenso fest wie der Leitungsdraht selbst sein und es muss vollkommener Kontakt herrschen, da sonst der durchfliessende Strom die Verbindungsstelle erhitzt und mit der Zeit zerstört.

Um elektrolytische Vorgänge, welche ebenfalls mit der Zeit zerstörend wirken, zu vermeiden, sollen mit Ausnahme des Lotes keine anderen Metalle als Verbindungsmaterial verwendet werden, d. h. es dürfen für Kupferleitungen keine Eisenverbindungen u. s. w. gewählt werden. Dasselbe gilt von den Bindedrähten, welche die Leitungen auf den Isolatoren halten.

Kabelgarnituren.

Hierunter versteht man alle Apparate, die zur Verbindung und Verteilung der Kabel oder zum Anschliessen von deren Enden verwendet werden, wie: Verbindungs-, Abzweig- und Kreuzmuffen, Kabelverteilungskästen und Endverschlüsse u. s. w.

Endverschlüsse.

26. Zweck der Endverschlüsse.

Besonders schwierig sind die Verbindungen bei Kabeln herzustellen, da dieselben, wie an anderer Stelle dieses Bandes auseinandergesetzt, zum Teil eine Isolierung aus Fasergespinsten erhalten, die gern Feuchtigkeit aufnehmen.

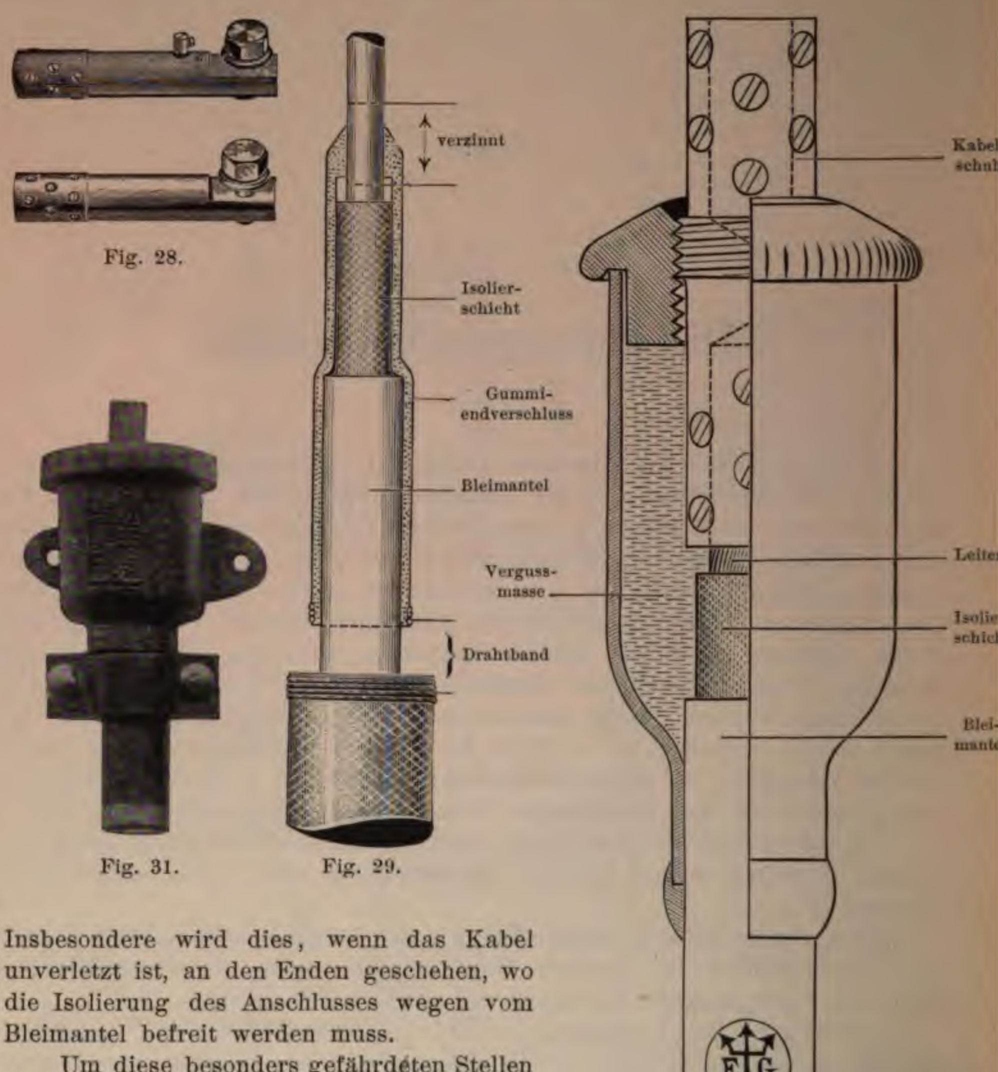


Fig. 28.

Fig. 31.

Fig. 29.

Fig. 30.

Insbesondere wird dies, wenn das Kabel unverletzt ist, an den Enden geschehen, wo die Isolierung des Anschlusses wegen vom Bleimantel befreit werden muss.

Um diese besonders gefährdeten Stellen der Kabel zu schützen, müssen bei allen Faserstoffkabeln gut dichtende Endverschlüsse angewendet werden.

27. Kabelschuhe.

Um zunächst den Leiter bequem anschliessen zu können, wird er mit einem besonderen Kabelschuh versehen, der verschiedene Gestalt hat, je nachdem derselbe zur Verbindung zweier Kabel, zum Anschluss derselben an eine Schalttafel oder dergl. dienen soll. Die Kabelschuhe fassen in beträchtlicher Länge über den Leiter und werden auf demselben durch eine grössere Anzahl von Schrauben gehalten, die mit abgerundeten Spitzen auf das Kabel drücken. Angelötet werden die für Kabel bestimmten Anschlussstücke nie. — Für vorhandene Prüfdrähte sind besondere isolierte Kontakte vorzusehen.

So zeigt z. B. Fig. 28 zwei Kabelschuhe[1]) der SIEMENS-SCHUCKERT Werke und zwar in zwei Typen, den einen mit, den anderen ohne Prüfdrahtanschluss. Fig. 30 zeigt in ihrem oberen Teil einen Metallendverschluss von FELTEN & GUILLEAUME, der auf beiden Seiten mit Bohrungen zur Aufnahme der Leiter und mit Spitzschrauben zu ihrer Befestigung versehen ist.

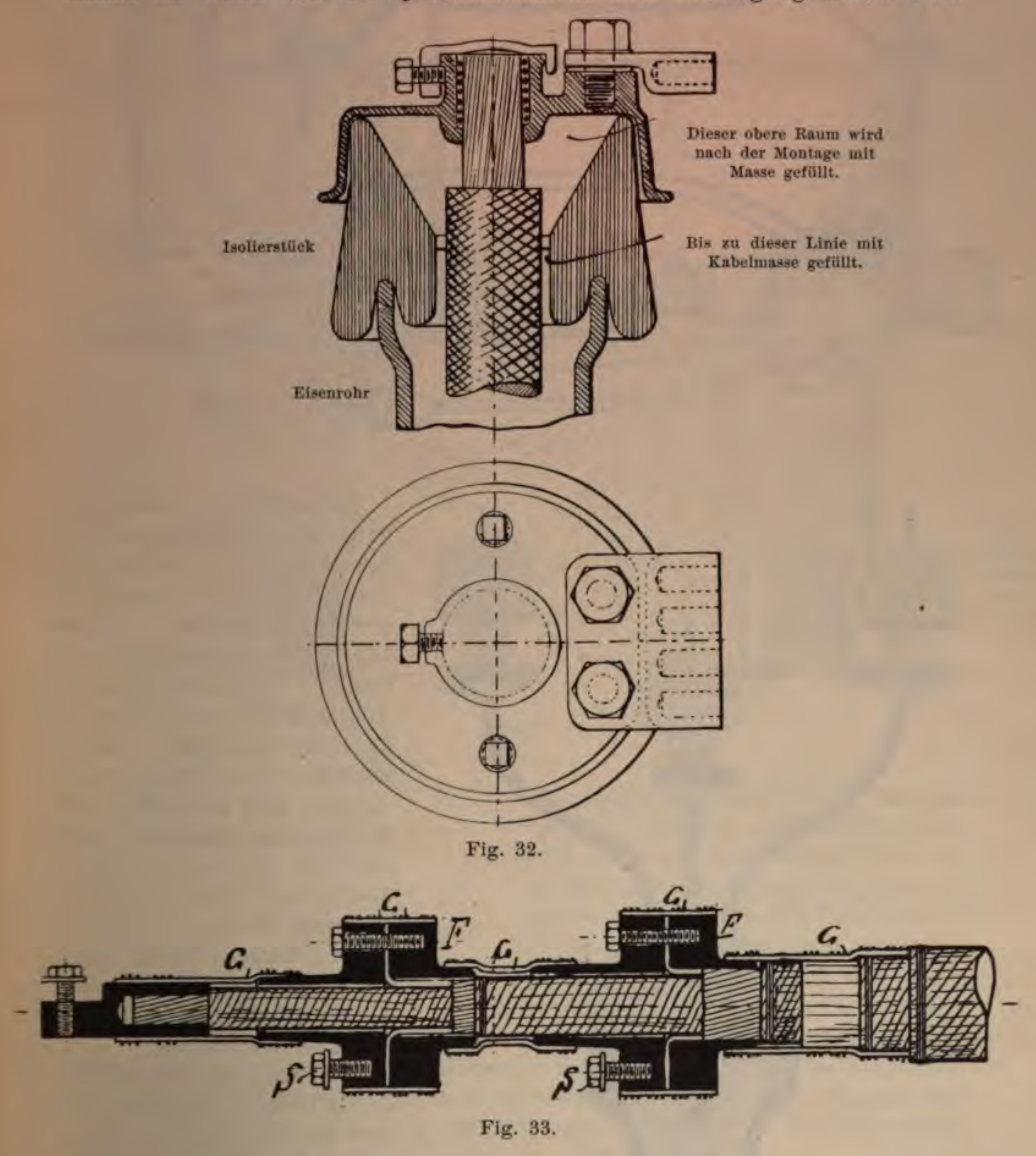


Fig. 32.

Fig. 33.

Bei Gummikabeln oder bei Verlegung von Kabeln in abgeschlossenen und absolut trockenen Räumen kann unter Umständen das Schutzgehäuse für den Endverschluss entbehrt werden und es treten an dessen Stelle einfache Kabelschuhe.

1) Über Kabelschuhe für Installationsleitungen siehe S. 71 u. 72.

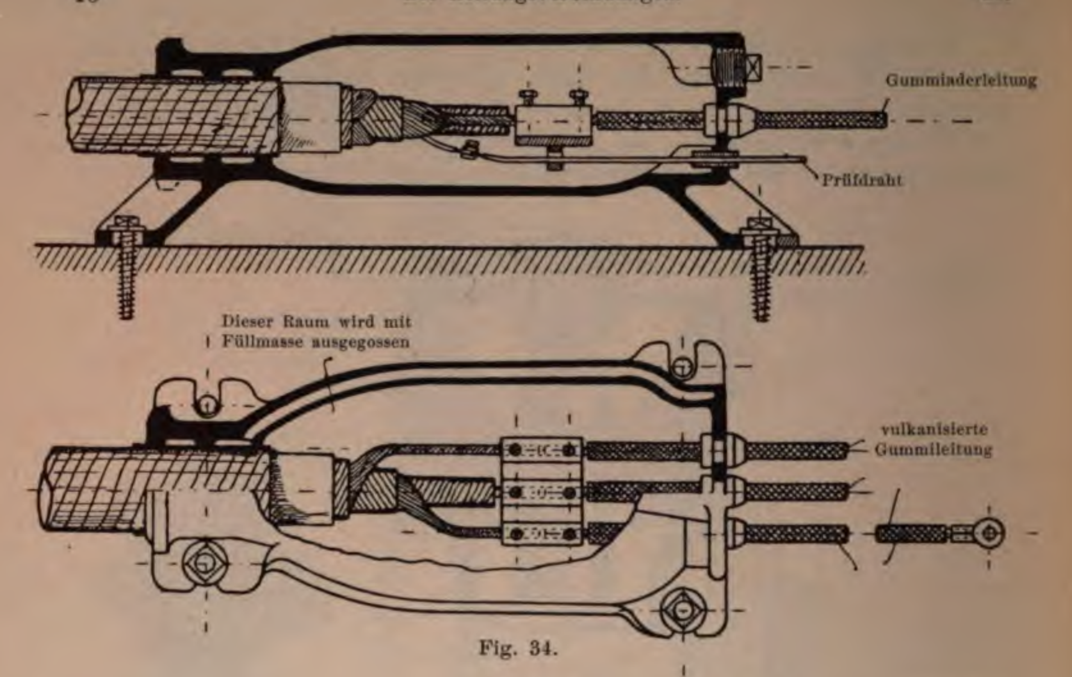


Fig. 34.

28. End-verschlüsse für Einfach-kabel.

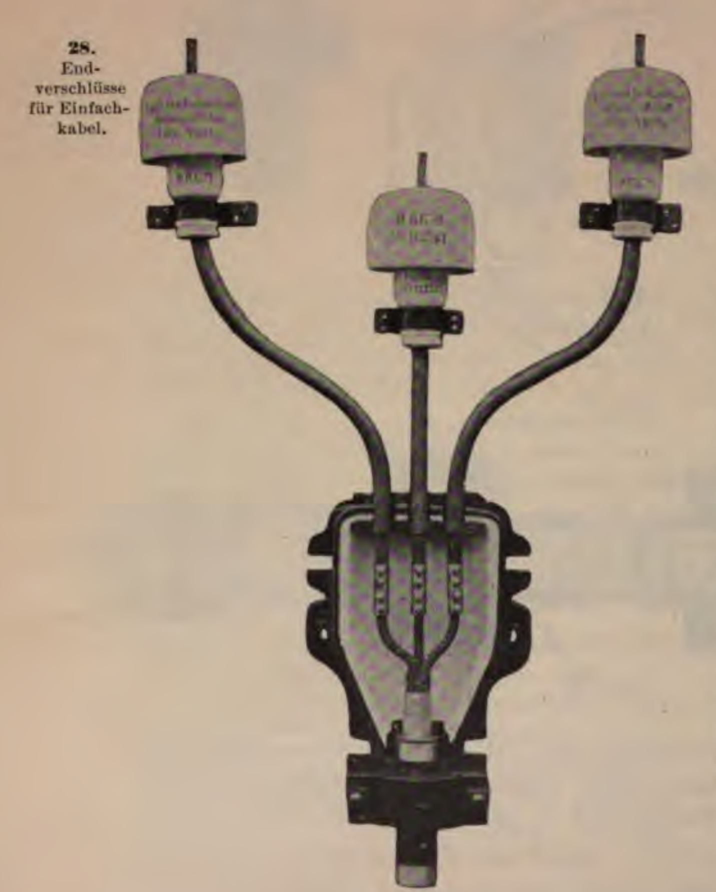
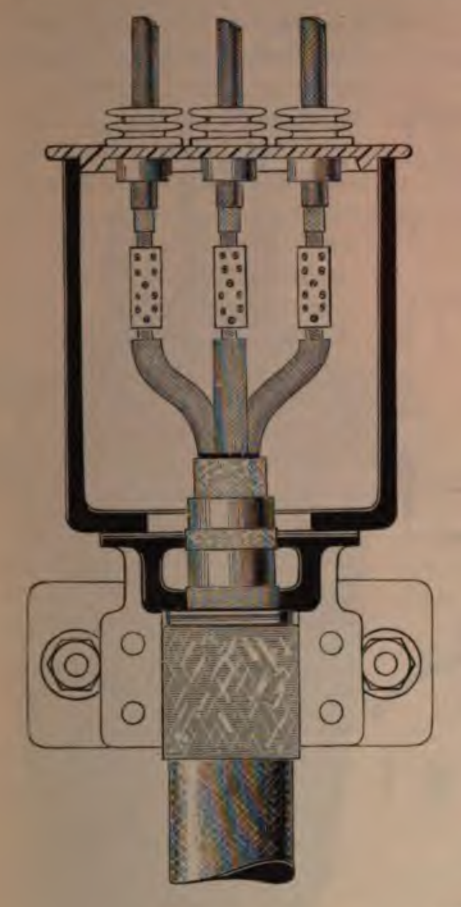


Fig. 35.

Ist der Metallendverschluss aufgesetzt, so muss noch ein Schutz um die freigelegte Isolierung des Kabels geschaffen werden. Hierfür genügt häufig eine Umhüllung mit Gummi. Um einen sicheren Anschluss zu erreichen, wird das Kabel abgestuft,[1]) d. h. es wird jede Umspinnung etwas weniger weit abgeschält als die darunter liegende. Darauf wird ein Gummischlauch übergezogen und dieser an mehreren Stellen mit Bindedraht befestigt. Fig. 29 zeigt einen derartigen von Felten & Guilleaume ausgeführten Gummiendverschluss.

An Stelle der Abdichtung durch Gummi, der nicht immer auf die Dauer genügend isoliert, sind in den letzten Jahren vielfach andere Konstruktionen verwendet worden, von denen in Fig. 30 eine von Felten & Guilleaume

1) Montagevorschrift siehe S. 43.



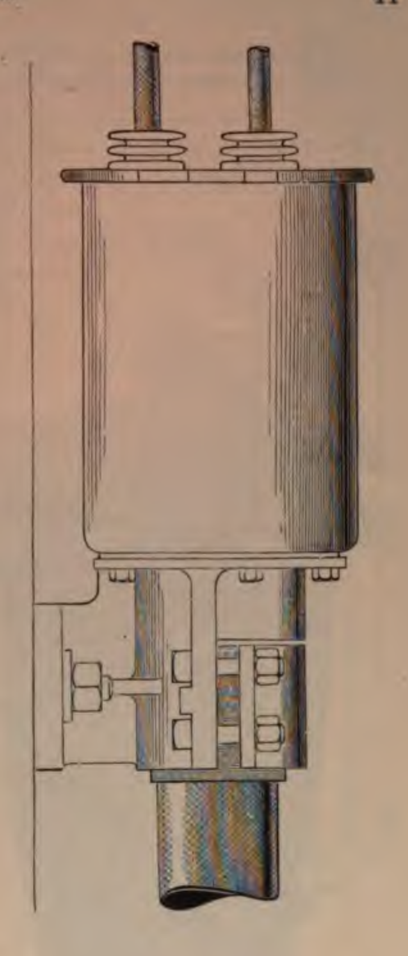
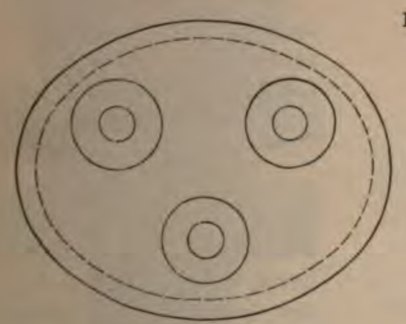


Fig. 36.



ausgeführte Art gezeigt ist. Ein flaschenähnlicher Behälter aus Isoliermaterial wird gegen das Kabel abgedichtet und mit Isoliermasse ausgegossen. Zum Abschluss wird auf den mit Gewinde versehenen Metallendverschluss ein Deckel geschraubt, welcher tief in das Gefäss hineinragt. Die SIEMENS-SCHUCKERT Werke verwenden eine ähnliche Konstruktion; an Stelle des flaschenförmigen Körpers tritt ein glattes Isolierrohr.

Statt des isolierenden Gefässes verwenden die Land- und Seekabelwerke einen eisernen Topf (Fig. 31), der mit besonderen Laschen zur Befestigung versehen ist.

Einen von der South Eastern Railway viel verwendeten Endverschluss zeigt Fig. 32, der besonders in Verbindung mit Eisenrohren gute Dienste leistet.

29. Endverschlüsse für konzentrische Kabel.

Hier sind in erster Linie die von den SIEMENS-SCHUCKERT Werken gebauten und in Fig. 33 erläuterten Endverschlüsse zu erwähnen. Die einzelnen Drähte des mittleren und äusseren Leiters werden senkrecht vom Kabel abgebogen, so dass sie eine Kreisfläche bilden. Sie werden nun zwischen

je zwei Flanschen *F* festgeklemmt, an denen die Anschlüsse durch Schrauben *S* hergestellt werden. Die übrigen frei gelegten Teile des Kabels werden durch Gummischläuche *G* geschützt, die so lang sind, dass sie über die Rohransätze der Flanschen hinwegfassen. Sie werden mit Bindedraht festgebunden. Derartige Endverschlüsse werden bis zu 2000 Volt verwendet.

Darüber hinaus findet die in Fig. 34 gezeigte Anordnung Verwendung. Die einzelnen Drähte werden vom Kabel abgebogen und zu einem Seil zusammengedreht, welches nunmehr in die gewöhnlichen Klemmvorrichtungen passt.

Es können aber auch Ringanschlüsse Verwendung finden, die um die konzentrischen Leiterschichten gelegt werden (z. B. Fig. 41).

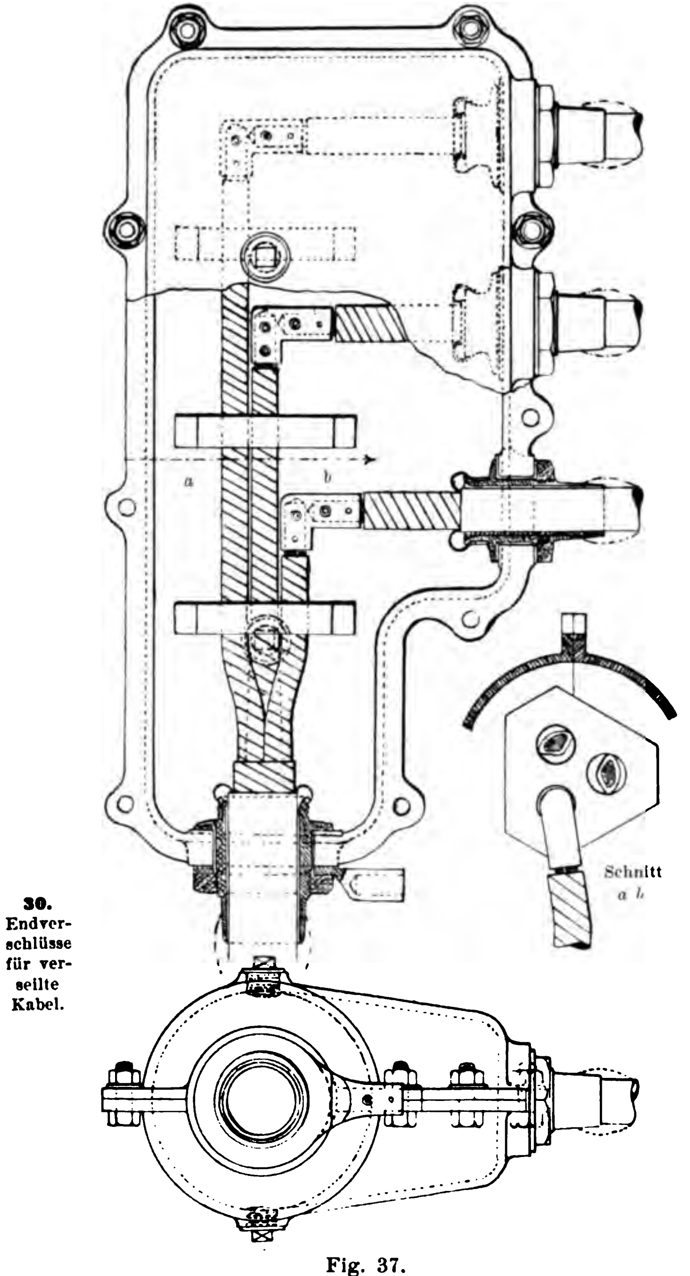


Fig. 37.

30. Endverschlüsse für verseilte Kabel.

Um verseilte Faserstoffkabel in ihre Einzelleiter aufzulösen, bedarf es ebenfalls besonderer Endverschlüsse. Die Verbindungen der einzelnen Kabeladern mit den abgehenden Leitungen erfolgt, wie es auch Fig. 34 schon für konzentrische Kabel zeigt, durch Verbindungshülsen, die sich innerhalb von Gefässen befinden, welche ausgegossen werden. Die Verbindungsstücke sind teils lose, teils sind sie unter Zwischenschaltung geeigneter Isolierstücke mit dem Verschlusskörper fest verbunden. Der letztere ist in der Regel mehrteilig, sei es, dass er in der Längsrichtung geteilt wird, wie es Fig. 35, Endverschluss für verseilte Dreileiterkabel der Land- und Seekabelwerke, zeigt, sei es, dass das ungeteilte Gefäss auf den unteren Teil aufgeschraubt wird, nachdem man es über die Verbindungsstelle herübergezogen hat (Fig. 36 Felten & Guilleaume). Die Ausführungsstellen werden durch besondere Isolierhülsen aus Porzellan, Hartgummi, Stabilit oder dergl. vor der Berührung mit dem Gehäuse geschützt.

Im übrigen zeigt Fig. 35 noch, in welcher Art die Land- und Seekabelwerke die aus dem Endverschluss heraustretenden Leitungen isolieren. Dieser Anschluss ist für 10000 Volt bestimmt. Fig. 37 zeigt einen von der South Eastern Railway verwendeten Endverschluss zur Auflösung verseilter Kabel in Einfachleitungen.

Ein genaues Bild über die Montage eines Endverschlusses für verseilte Kabel giebt die nach-

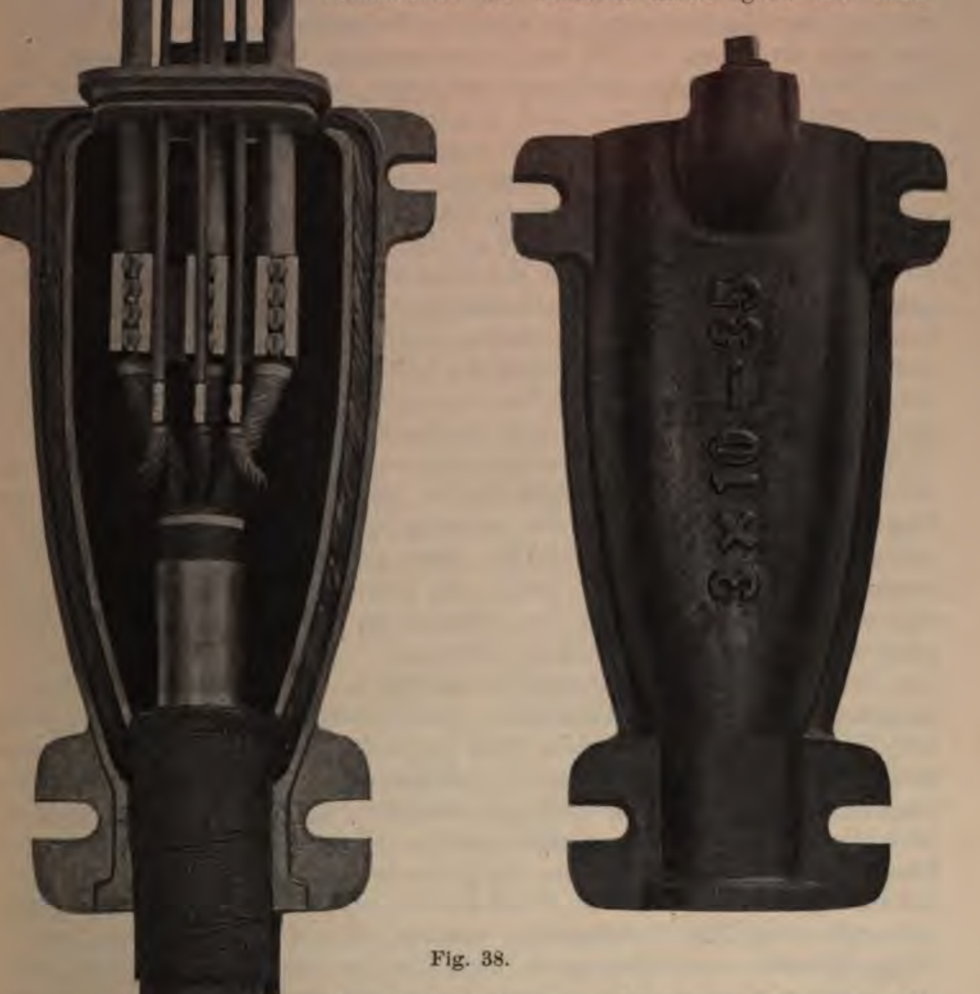


Fig. 38.

stehend wiedergegebene Montagevorschrift der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Montagevorschrift für Endverschlüsse für zweifach verseilte Kabel der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Der Endverschluss (Fig. 38) besteht aus dem gusseisernen Schutzgehäuse, dem Deckel aus Stabilit und den auf ein Stabilitbrettchen aufgeschraubten Klemmen.

Das Kabelende und die Mitte des Klemmbrettchens muss nach der Montage etwa in zwei Drittel Länge des Endverschlusses liegen. Nach diesem Anhaltspunkte richten sich die Abstufungen des Kabels. Es wird zunächst am Ende des Einführungshalses, wo die Rille für die Juteschnur beginnt, ein Drahtbund um das Kabel gewickelt. Alsdann wird durch einen Schnitt rings um das Kabel die obere Jutelage durchschnitten und auf das Ende zu abgewickelt. Darauf wird mit einer Dreikantfeile die Eisenarmatur ringsum eingefeilt und abgezogen. Dann wird die darunterliegende Jutelage wie die obere Lage entfernt, so dass der Bleimantel bis zum Ende freiliegt. Nun wird in einem Drittel der Innenraumlänge des Endverschlusses von dem Drahtbund ab der Bleimantel mit einem scharfen Messer ringsum eingeschnitten. Dieser Schnitt darf die darunterliegende Isolierschicht nicht verletzen. Dann wird etwa 1 cm weiter die obere Isolierschicht mit Garn abgebunden, bis auf die Isolierung der beiden Leiter eingeschnitten und abgelöst. Hierauf werden letztere, dem Nutenabstand der Klemmen entsprechend, auseinandergebogen und so weit vom Ende mit Garn abgebunden, als die reichliche halbe Länge der Klemmen beträgt. Das Abbinden hat den Zweck, das Ausfasern der Isolierschicht zu verhindern. An dem Garnbund wird nun die unterste Isolierung ebenfalls ringsum eingeschnitten und abgelöst, worauf die blanken Enden der Leiter in die Klemmen eingeschraubt werden. Die aus dem Endverschluss herausführenden Gummileitungen werden dann ebenfalls angeschnitten und in die Klemmen eingeschraubt, vorher aber muss der Stabilitdeckel des Endverschlusses auf dieselben aufgeschoben werden. Vor dem nun folgenden Umbau des Schutzgehäuses wird an der Stelle des Einführungshalses eine Packung aus mehreren Lagen getränkter Leinwand um das Kabel gewickelt, damit das spätere Auslaufen der Füllmasse verhindert wird. Dann werden die beiden Hälften des Schutzgehäuses aufgesetzt und fest miteinander verschraubt. Der Deckel wird zurückgeschoben und mit zwei Schrauben befestigt.

Nunmehr wird die Füllmasse eingegossen. — Damit sich kein Wasser in dem Endverschluss beim Eingiessen der heissen Masse niederschlägt, muss derselbe vor dem Zusammenbau leicht angewärmt werden. Die Masse muss stets sorgfältig trocken aufbewahrt werden. Vor dem Eingiessen wird sie langsam zum Schmelzen gebracht; sie darf nicht überkochen oder anbrennen, wodurch sie unbrauchbar werden würde. Das Eingiessen muss in gut flüssigem Zustand langsam, aber stetig geschehen. Damit die sich bildenden Luftblasen Zeit haben an die Oberfläche zu steigen, ist es gut, die Muffe nicht mit einem Male vollzugiessen, sondern etwa in drei Absätzen, welche einige Minuten auseinanderliegen. Beim Erkalten schwindet die Masse ziemlich stark, es muss deshalb so lange nachgefüllt werden, bis das ganze Gehäuse gefüllt ist. Alsdann wird der Stöpsel ebenfalls leicht angewärmt und damit die Eingussöffnung verschlossen.

Verbindungsmuffen.

31. Zweck der Muffen.

Da Kabel nur in bestimmten Fabrikationslängen geliefert werden, sind Verbindungen dieser Kabellängen notwendig. Hierzu dienen besondere Verbindungsstücke, welche besonders gut geschützt werden müssen, da sie meistens im Erdreich liegen und nicht, wie der Endverschluss, oberhalb des Erdreiches in mehr oder weniger trockenen Räumen untergebracht werden.

32. Klemmvorrichtungen.

In den Muffen werden die miteinander zu verbindenden Kabelenden durch metallene Klemmen fest aneinandergepresst, wobei eine möglichst grosse Oberfläche der kontaktbildenden Teile zwecks sicherer Stromleitung herzustellen ist. Haben die durch Muffen oder T-Stücke zu verbindenden Kabel Prüfdrähte, so bedarf es zur Verbindung derselben besonderer Kontaktklemmen (etwa wie in Fig. 38). Die ganze Verbindungsstelle erhält ein kräftiges gusseisernes Gehäuse,[1]) welches mit Chatterton Compound oder einer ähnlichen isolierenden Füllmasse ausgegossen wird.

Die Verbindungsstücke für verschieden hohe Spannungen unterscheiden sich im allgemeinen nur durch die räumliche Dimensionierung voneinander und durch die Wahl der zur Isolierung benutzten Materialien (vgl. Fig. 39 u. 40).

33. Konstruktion der Verbindungsmuffe der A. E.-G.

Die Verbindungsmuffen, abgesehen von den Klemmen, werden von den meisten Firmen in wenig voneinander abweichenden Formen hergestellt, so dass es genügt, eine Konstruktion und den Gang der Verbindung genau zu beschreiben, von anderen nur auf die Abbildungen kurz hinzuweisen. Es seien hierzu Verbindungsmuffen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (Fig. 39 u. 40) gewählt.

Diese Verbindungsmuffen bestehen aus einem zweiteiligen, gusseisernen Schutzgehäuse mit verzinnten Verbindungsklemmen aus Messing. Der obere Teil des Schutzgehäuses ist in der Mitte mit einer Öffnung zum Eingiessen der Füllmasse versehen. Die Öffnung wird durch einen gusseisernen Stöpsel verschlossen. An den Enden des Schutzgehäuses befinden sich an jeder Seite zwei seitlich aufgeschlitzte Löcher zur Aufnahme des Schraubenbolzens, durch welche nach Fertigstellung der Montage das Ober- und Unterteil des Gehäuses miteinander verschraubt werden. Die Verbindungsklemmen sind zylindrisch und haben an je einem Ende einen flachen Flansch mit einem bezw. zwei Schraubenbolzenlöchern. Sie sind der Länge nach mit einer konischen Bohrung versehen, deren weitester Durchmesser an der Seite des Flansches liegt. Zu den Verbindungsklemmen gehört noch je ein konischer Dorn aus Messing.

Nachdem die Kabelenden auf die richtige Länge geschnitten sind, wird die Eisenarmierung an der Innenseite des Einführungskabels durch Einfeilen mit einer Dreikantfeile abgelöst, auch werden die Jutelagen, zwischen welche jene eingebettet ist, ebensoweit entfernt, so dass der Bleimantel von da ab bloss liegt. Damit sich die Eisenarmierung und Jute nicht aufwickelt, muss vor dem Einfeilen ein Drahtbund, aus mehreren Windungen bestehend, herumgelegt werden, genau wie es bei Herstellung der Endverschlüsse auch zu geschehen hat.

Darauf wird etwa 2 mm länger, als die konische Bohrung der Klemme ist, der Bleimantel mit der darunterliegenden getränkten Faserisolierung mit einem scharfen Kabelmesser bis auf die Kupferseele ringsum eingeschnitten und abgelöst. Etwa 20 mm weiter wird der Bleimantel ringsum noch einmal, aber nur bis auf die Faserisolierung, eingeschnitten und ebenfalls abgelöst. Dieser Schnitt muss besonders vorsichtig gemacht werden, die Isolierschicht darf dadurch nicht verletzt werden, weil sonst durch Gradbildung an der Schnittstelle leicht eine metallische Verbindung zwischen Kabelseele und Bleimantel (also Erde) herbeigeführt werden kann. Die Faserisolierung ist an der Schnittstelle zur Verhütung des Aufdrehens mit Garn abzubinden.

---

1) Diese Form zeigten schon die ältesten Muffen, wie sie z. B. von Edison angewendet wurden, vgl. ETZ 1893, S. 583, Fig. 6, 8 u. 9.

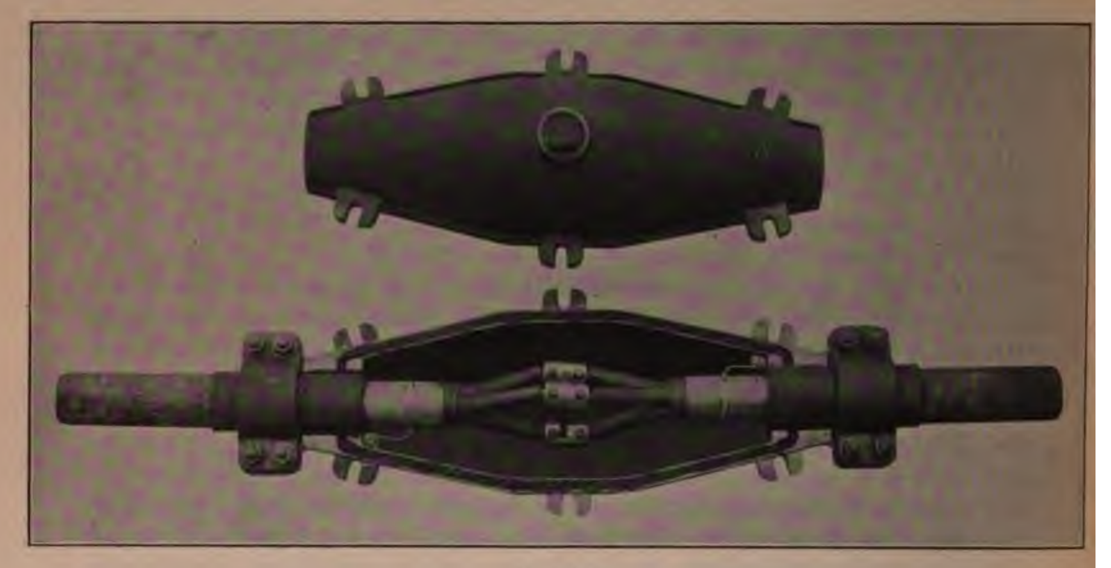


Fig. 39.

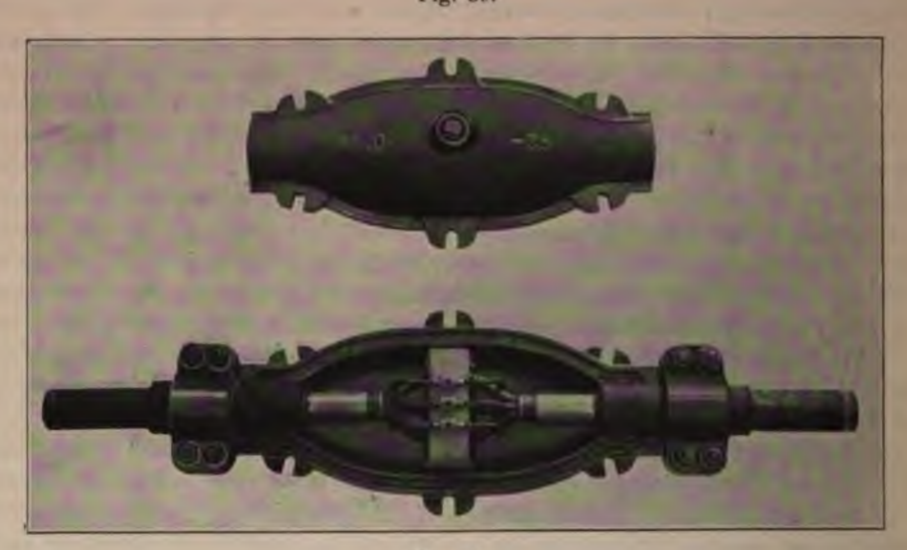


Fig. 40.

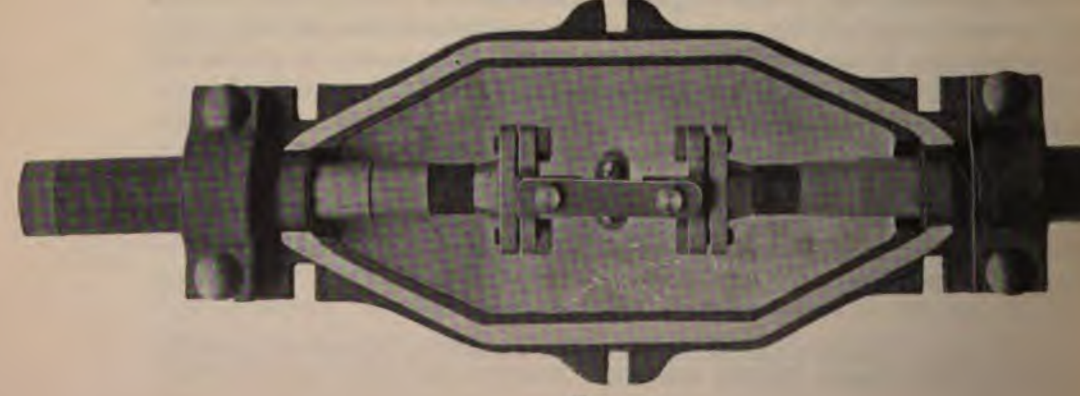


Fig. 41.

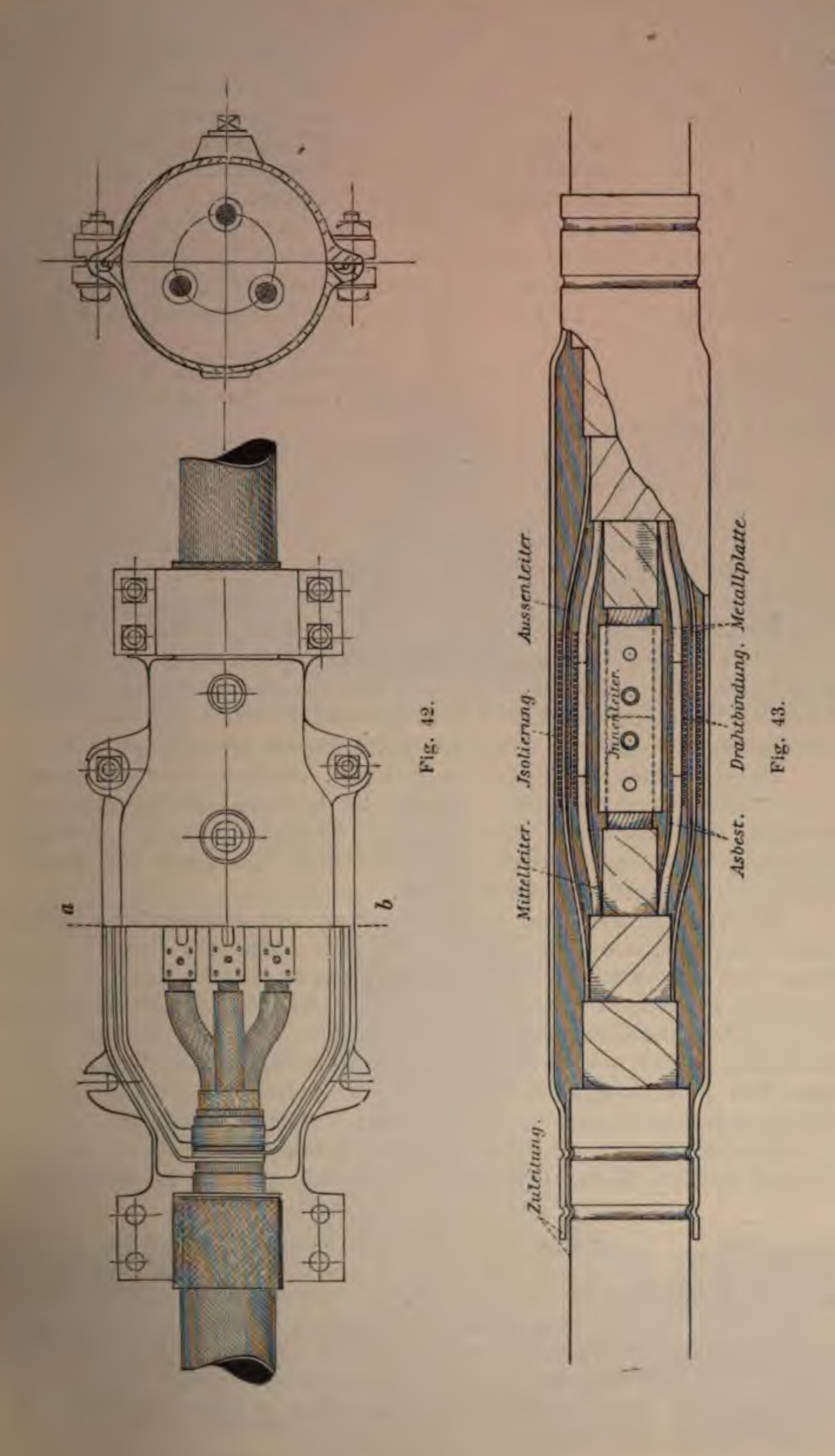

a
b
Aussenleiter
Jsolierung
Mittelleiter
Innenleiter
Metallplatte
Drahtbindung
Asbest
Zuleitung

Fig. 42.

Fig. 43.

Nun werden die Klemmen auf die freigelegten Litzen der Kabelenden aufgeschoben und durch Einkeilen der bereits erwähnten konischen Dorne befestigt. Es ist darauf zu achten, dass durch Einkeilen des Dornes die Klemme so stark befestigt werden muss, dass sie weder gedreht noch abgezogen werden kann. Es ist dies mit der wichtigste Teil der Montage, da durch den lockeren Sitz der Klemme Erwärmungen durch den Strom und damit weitere Störungen verursacht werden können.

Nach der Befestigung der Klemme wird an dem Ende der Armierung zur Abdichtung imprägnierte Leinwand aufgewickelt. Dieselbe muss so stark aufgewickelt sein, dass sie den Muffenhals vollständig ausfüllt und später das Auslaufen der Füllmasse verhindert. Die Dichtung muss ebenfalls mit Garn abgebunden werden.

Nachdem die Enden so zubereitet sind, werden sie in die richtige Lage gebracht und die Flansche der Klemmen durch die Schraubenbolzen miteinander verschraubt.

Darauf wird das Schutzgehäuse darangesetzt. In dem Unterteil desselben befindet sich am Rand eine Rille, in welche ein am Oberteil befindlicher Falz genau hineinpasst. In die Rille wird eine imprägnierte Juteschnur zur Abdichtung eingelegt. Mittels der vier Schraubenbolzen wird nun das Ober- und Unterteil fest miteinander verschraubt. Die Einzelheiten der bis zum Aufschrauben des Oberteils fertig montierten Muffe sind aus Fig. 39 u. 40 genau ersichtlich.

Nunmehr wird die Füllmasse in die Muffe gegossen, in gleicher Weise, wie es auf S. 44 schon beschrieben ist, und dann die Eingussöffnung verschlossen. Über den Verschlussstöpsel wird dann ein wenig Füllmasse gegossen. Das Eingiessen nimmt je nach der Grösse der Muffe eine bis drei Stunden in Anspruch.

Um ein Rosten der Muffen zu verhüten, erhalten dieselben einen heiss aufgetragenen Asphaltanstrich. In Fig. 39 ist noch eine Drahtverbindung zwischen dem Bleimantel und der Muffe erkennbar. Sie hat den Zweck, Spannungsunterschiede zwischen Blei und Erde und somit den Bleimantel gefährdende Erdströme auszuschliessen.

34. Verbindungsmuffen der Land- u. Seekabelwerke, Felten & Guilleaume u. Siemens Broth.

Fig. 41 zeigt noch eine Verbindungsmuffe für konzentrische Kabel der Land- und Seekabelwerke und Fig. 42 eine solche für dreifach verseilte Kabel von Felten & Guilleaume. Bemerkenswert bei der letzteren ist noch, dass sich zwischen der Kabelschelle und der eigentlichen Muffenkammer noch eine Asphalt-Abdichtungskammer befindet mit den dem Durchmesser der Bleihüllen entsprechenden Bohrungen in den beiden Seitenwänden, um eine besonders gute Auflage des Bleimantels zu erreichen und ihn so gegen Beschädigungen bei Lagenveränderungen der Muffen zu schützen.

Eine andere Art der Verbindung von konzentrischen Kabeln zeigt noch die von Siemens Broth., London, zur Verfügung gestellte Zeichnung Fig. 43.

Abzweig- und Kreuzmuffen.

35. Konstruktion.

Sie entsprechen in ihrer Anordnung durchaus den Verbindungsmuffen. Bei der Montage braucht in der Regel das durchgehende einfache Verteilungskabel nicht geschnitten zu werden, es ist nur nötig, die Kupferseele desselben auf die reichliche Breite der Klemme blosszulegen und nach beiden Seiten hin die Faserisolierung, den Bleimantel und die Jutelage mit der Eisenarmierung abzustufen.

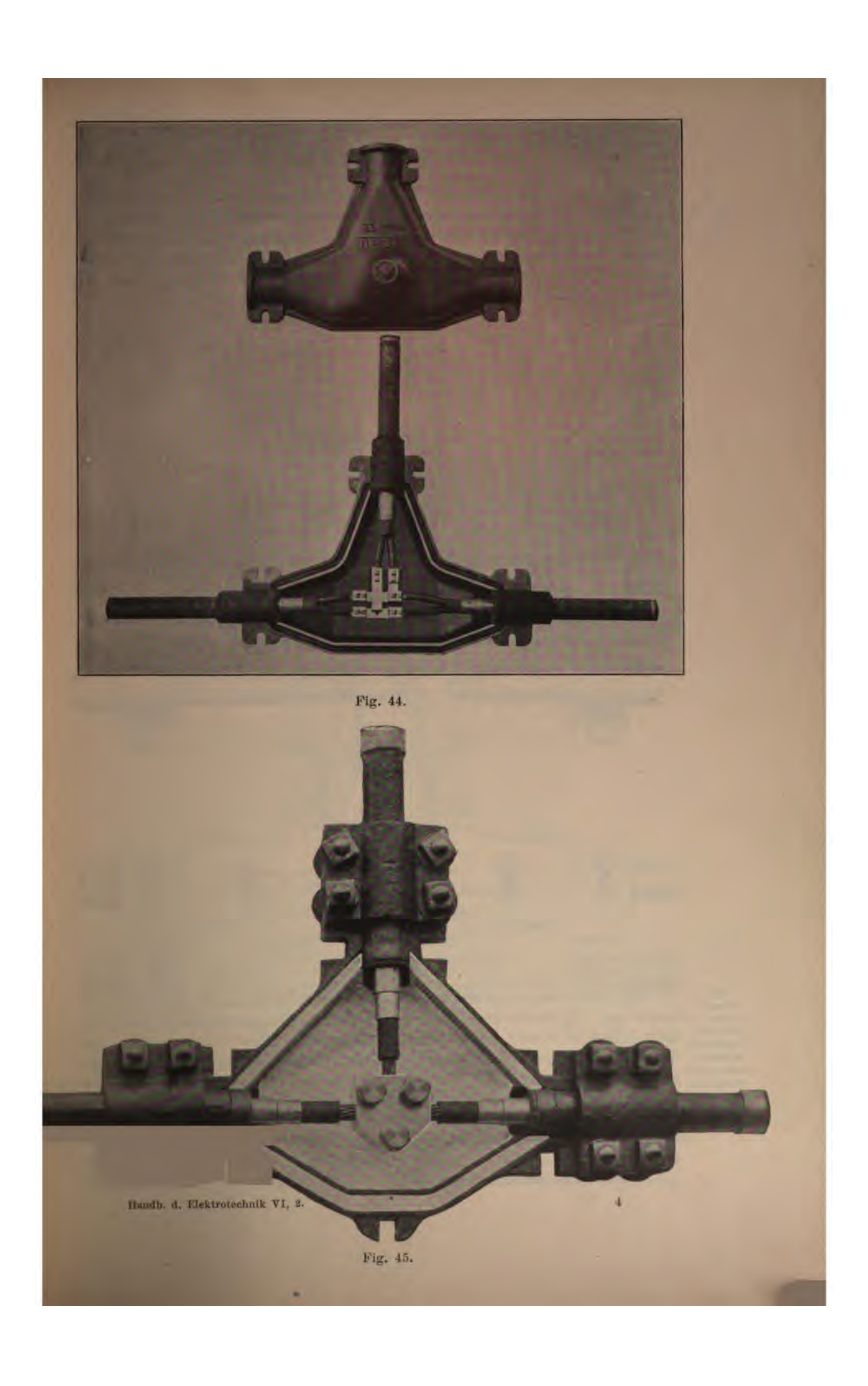


Fig. 44.

Fig. 45.

36. Abzweigmuffen von Siemens Broth.

Es seien zunächst einige Abzweigmuffen von Siemens Broth. London besprochen. Fig. 119[1]) zeigt eine solche für konzentrische Kabel. Bemerkenswert ist die Art des Leiteranschlusses. Es wird ein mit einem wulstigen Ansatz versehenes Metallstück unter die abgebogenen konzentrischen Leiterschichten geschoben und diese nunmehr so durch Bindedraht befestigt, dass sich die einzelnen Drähte fest in die Vertiefung schmiegen.

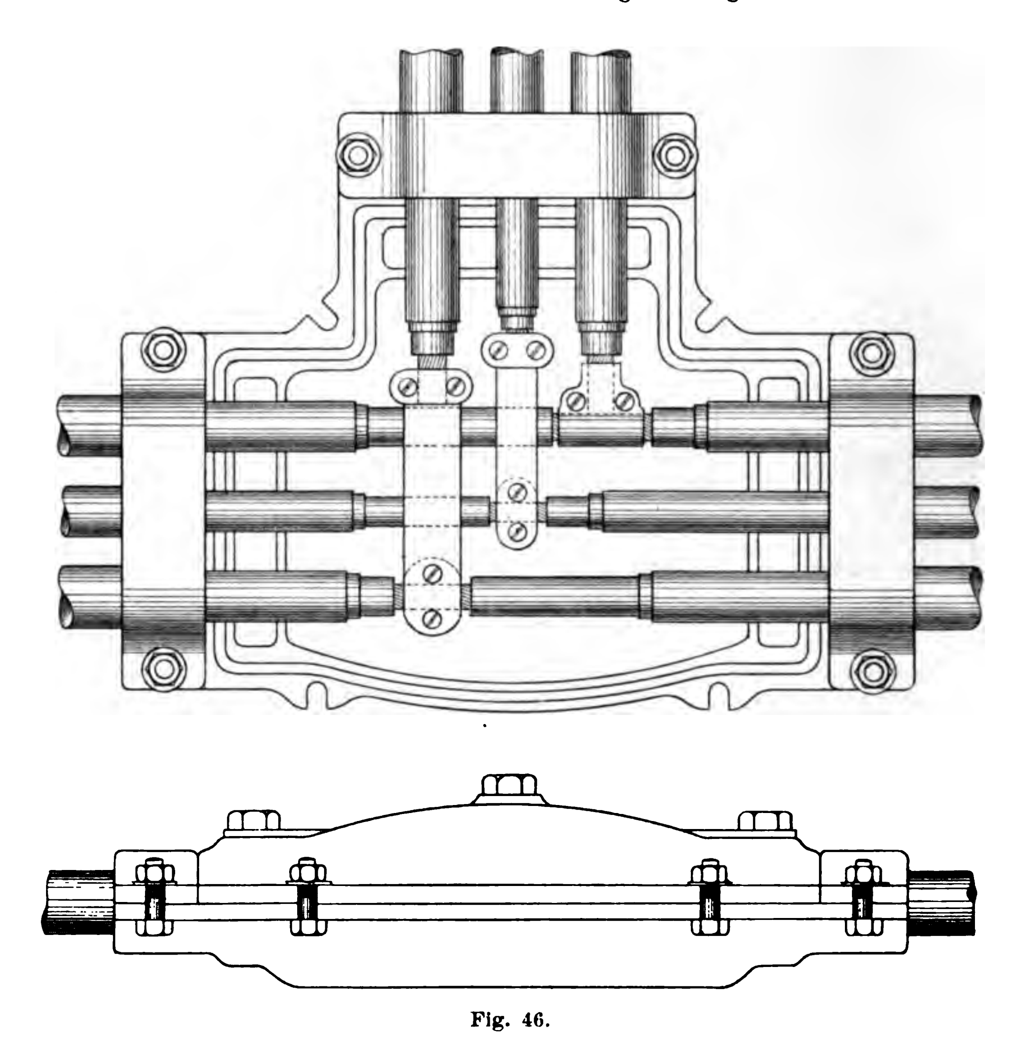


Fig. 46.

37. Abzweigmuffen der A. E.-G., Land- und Seekabelwerke, Süddeutschen Kabelwerke.

Fig. 120[1]) zeigt den Anschluss eines konzentrischen an ein konzentrisches Kabel und Fig. 140[1]) den Übergang von einem konzentrischen in zwei verseilte Kabel in einer Abzweigmuffe. Sämtliche Muffen sind zweiteilig. Bei der ersteren (Fig. 120) ist ausser dem oben beschriebenen Anschluss an ein konzentrisches Kabel die Verbindung mit dem abzweigenden Kabel bemerkenswert. Die konzentrisch gelagerten Drähte sind nach einer Seite gebogen, werden zusammengedreht und nunmehr wie ein gewöhnliches Seil in den Kabelschuh eingeführt.

1) Siehe Tafel am Ende dieses Bandes.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft verwendet die in Fig. 44 wiedergegebenen Abzweigmuffen, bei denen die Art der Abzweigung zu beachten ist. Sie erfolgt durch sich überbrückende Kupferschienen. In etwas anderer Form fertigen die Land- und Seekabelwerke ihre dem gleichen Zweck

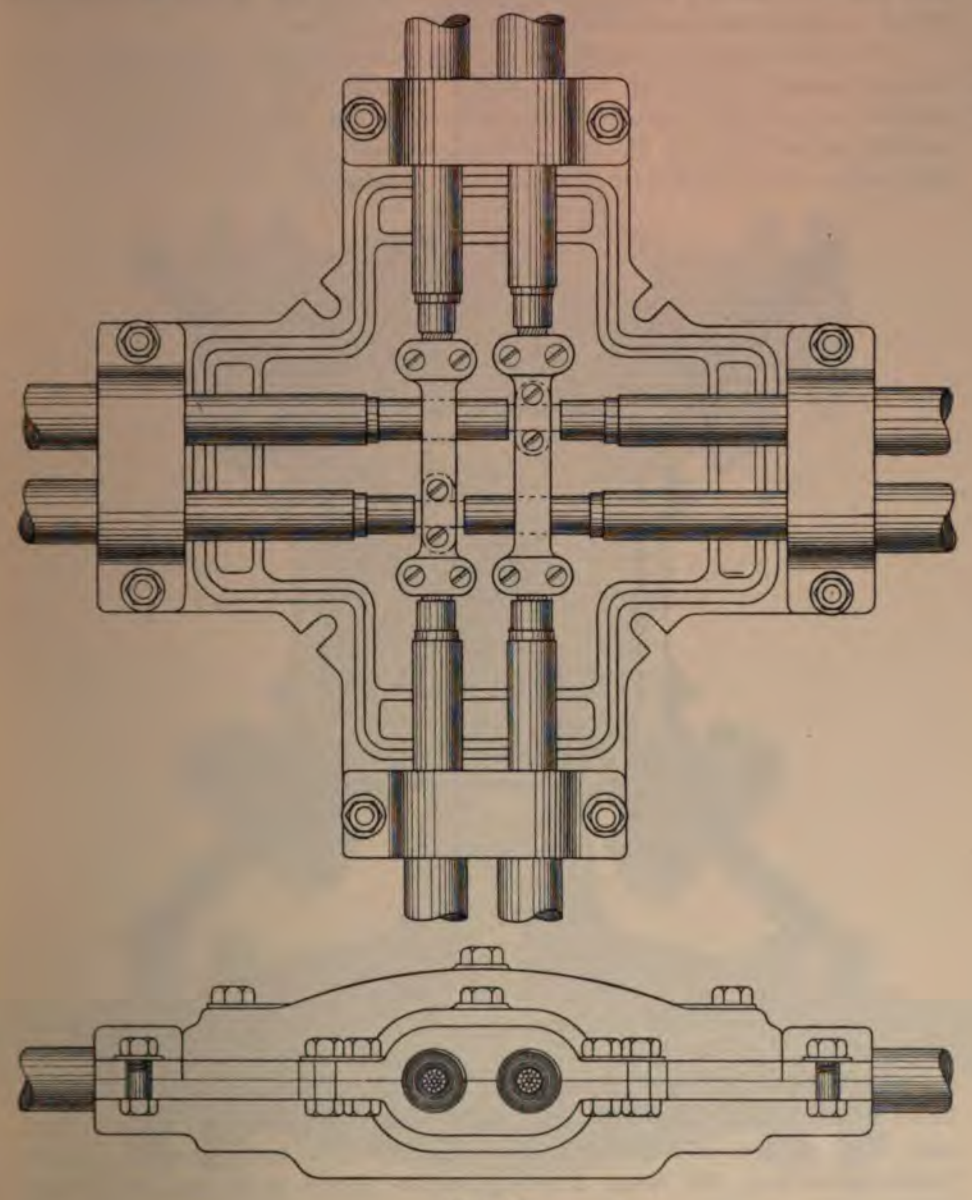


Fig. 47.

dienenden Muffen (Fig. 45). Eine sehr zweckmässige und räumlich günstige Anordnung zeigt die Kreuzungsmuffe derselben Firma Fig. 48.

Im allgemeinen ist es üblich, für jedes abzweigende Kabel eine besondere Muffe zu setzen und, wenn mehrere Abzweigungen stattfinden sollen, einen Kabelkasten zu verwenden. Die Süddeutschen Kabelwerke, Mannheim-

Neckarau stellen aber auch Abzweigarmaturen her, die für mehrere Einzelkabel bestimmt sind. Eine Abzweigmuffe dieser Art zeigt Fig. 46, eine Kreuzungsmuffe Fig. 47. Die Konstruktionen der beiden letzteren Firmen zeigen den Armaturen vorgelagerte Schellen, welche das Kabel unverrückbar mit ihnen verbinden, sodass ein Auseinanderziehen der Muffenverbindungen durch Lagenveränderungen des Kabels unmöglich ist.

38. Abzweigmuffen mit Sicherungen.

Trotzdem derartige Armaturen meistens unter Pflaster liegen und infolgedessen schwer zugänglich sind, macht es sich doch häufig erforderlich, unmittelbar an den Abzweig eine Sicherung zu setzen. Abzweigmuffen werden daher auch mit Sicherungen ausgerüstet. Als Beispiel zeigt Fig. 49 eine solche der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

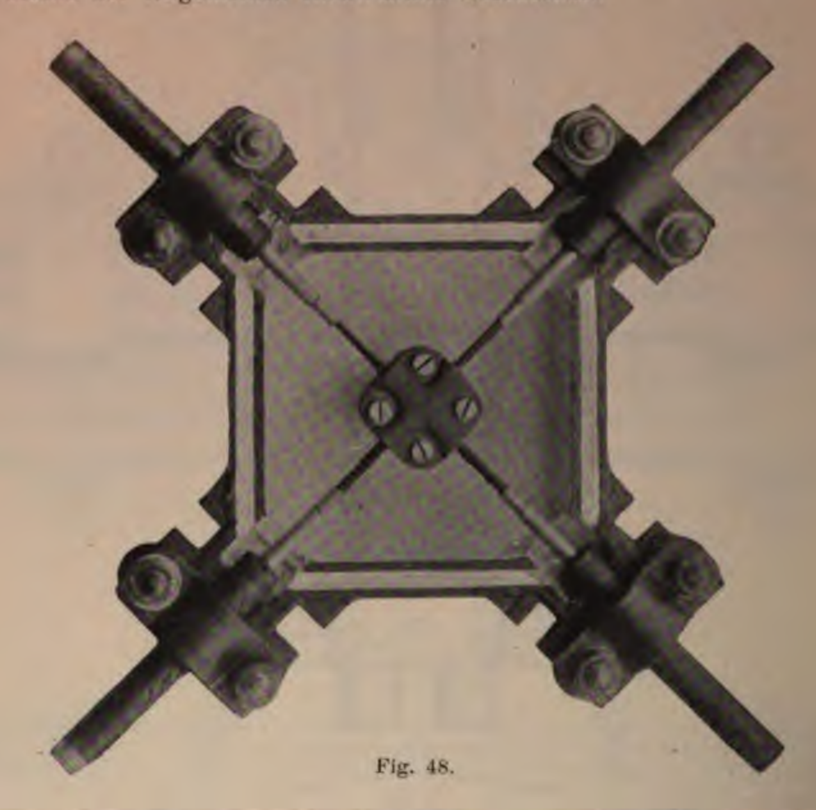


Fig. 48.

Diese Abzweigmuffen mit Sicherungen unterscheiden sich von denen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft ohne Sicherung nur durch die Einrichtung der Klemme. Dieselbe ist in der Schelle, welche das Verteilungskabel umfasst, mit Hartgummi ausgelegt. Ausserdem trägt sie einen seitlich nach oben gebogenen Bügel mit einer Kontaktfläche und Schraube für die Schmelzsicherung. Zu dieser Abzweigklemme gehört noch eine zweiteilige Metallschelle, welche ebenfalls eine Kontaktfläche mit Schraube für die Schmelzsicherung trägt.

Nachdem genau wie bei der Abzweigmuffe ohne Sicherung das Ende des Abzweigkabels zubereitet und die Klemme durch den Dorn festgekeilt ist und von dem durchgehenden Kabel, wie ebenfalls bereits beschrieben,[1])

1) Vergl. S. 45 dieses Bandes.

Armierung, Bleimantel und Isolierschicht abgelöst sind, wird das Abzweigkabel mittels der Abzweigklemme an das durchgehende Kabel angeschraubt. Daneben wird auch die Metallschelle auf die blanke Kabelseele so auf-



Fig. 49.

gesetzt, dass der Lochmittenabstand der Sicherungsschrauben an Klemme und Schelle mit dem der Schmelzsicherung übereinstimmt.

Da die Abzweigklemme durch die Hartgummieinlage von der Kabelseele isoliert ist, wird die leitende Verbindung vom durchgehenden zum Abzweigkabel erst durch Einsetzen der Sicherung hergestellt.

39. Muffenbezeichnungen. Während bei Verbindungsmuffen meistens dieselben Kabelquerschnitte zu verbinden sind, werden bei Abzweigmuffen oft die verschiedensten Querschnitte verbunden. Diese Armaturen werden daher so eingerichtet, dass möglichst viele Querschnitte in derselben Type vereinigt werden können. Dies geht natürlich nur bis zu einer gewissen Grenze, da der Ausgleich durch die Jutelagen, die den Abschluss an den Einführungsstellen bewerkstelligen, herbeigeführt werden muss (Fig. 49). Z. B. ist es aber üblich, Querschnitte von 25—95 mm², 120—240 mm² u. s. w. zusammenzufassen, wie auch die Aufschrift in Fig. 38 und 49 (A. E.-G.) zeigt. Bei der Bestellung von Abzweigmuffen müssen die genauen Querschnitte stets angegeben werden.

Kabelkästen.

40. Konstruktion. Bei der Vereinigung von mehr als drei oder vier Kabeln an einem Punkt bedient man sich sogenannter Kabelverteilungskästen mit oder ohne Schmelzsicherungen. Diese Schaltkästen werden ebenfalls unterirdisch, und zwar in der Regel auf Fundamente gebaut und sind leicht zugänglich. Die Abdeckung geschieht vermittels Schachtrahmens und Deckels, welche für den Einbau in den Strassendamm oder in Bürgersteige ausgeführt werden. Im Inneren befinden sich Sammelschienen, an denen die einzelnen Leiter anzuschliessen sind. Die Kabelkästen müssen vollkommen dicht abgeschlossen sein, was durch besonders konstruierte Deckel, die zum Öffnen der Kästen bei Revisionen dienen, in ausreichendem Masse geschieht. Zwecks leichterer Bedienung der Verbindungen und Sicherungen in den Kabelkästen werden diese in der Regel nicht wie die Muffen mit Isoliermasse ausgegossen, sondern auf Hartgummi- oder Porzellanisolatoren angebracht. Oft werden sie aber mit Öl angefüllt, welches immerhin leicht zu entfernen ist.

41. Kabelkästen von Siemens Broth. Fig. 145[1]) zeigt einen Kabelkasten von Siemens Broth. London, dessen Kabeleinführungen genau so ausgeführt sind, wie dies bei den Muffen der gleichen Firma geschieht. Aus diesem Grunde ist der Kasten aber geteilt und wird, da diese Art der Einführung nicht genügend abdichtet, mit Kabelmasse ausgegossen, indessen nur so hoch, dass die Sammelringe mit den Anschlussschrauben darüber hinausragen und infolgedessen zugänglich bleiben. Diese Konstruktion enthält keine Sicherungen. Der in Fig. 262[1]) gezeichnete und für Dreileiteranlagen mit geerdetem Mittelleiter bestimmte Kasten enthält dagegen Sicherungen und ist unter Vermittelung der Schaltstücke A abschaltbar. Für den Fall, dass bei diesen Kästen eine Kabeleinführung nicht benutzt wird, ist dieselbe durch einen gut passenden Holzpfropf verschlossen, was unbedenklich ist, weil die Kabelmasse den Eintritt von Feuchtigkeit verhindert.

42. Kabelkästen der A. E.-G. Die Kästen für Einfachkabel der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (Fig. 50) bestehen aus dem eigentlichen zur Aufnahme der Kabel bestimmten Kasten mit den Sammelschienen, der Verschlussglocke, dem Brunnenrahmen und der Abdeckplatte. Sie sind bis auf die Sammelschienen aus Gusseisen hergestellt. Diese bestehen aus verzinntem Messing. Die Aussparungen der Abdeckplatte werden mit Zement oder Asphalt ausgegossen.

In der Mitte des Kastens befinden sich übereinander angeordnet die Sammelschienen. Dieselben sind durch isolierte, eiserne Bolzen befestigt und durch Hartgummibuchsen voneinander getrennt. Die Sammelschienen haben

1) Siehe Tafel am Ende dieses Bandes.

für den Anschluss der Schmelzsicherungen mit Schrauben versehene, vorspringende Köpfe.

In den Seitenwänden der Kästen befindet sich für jeden Kabelanschluss eine runde Aussparung mit einer Arbeitsfläche nebst vier Schraubenbolzen

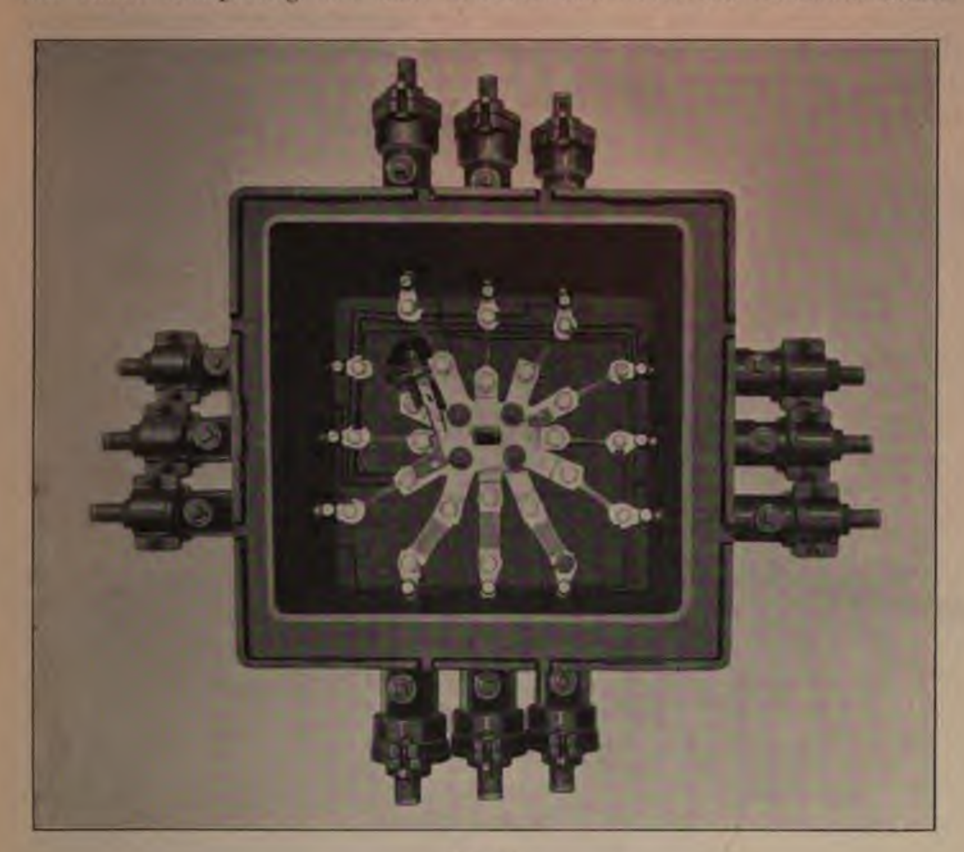


Fig. 50.

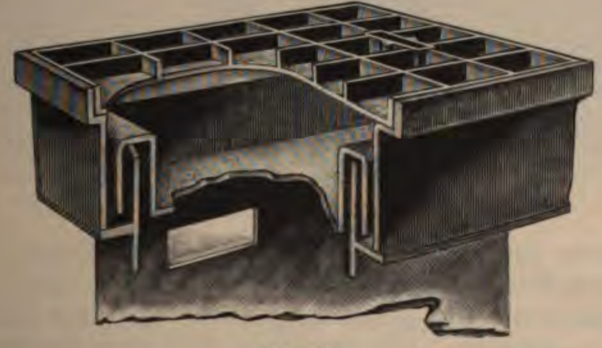


Fig. 50a.

an den Aussenseiten. Zum Anschluss der Kabel wird auf das Ende desselben ein Endverschluss auf die früher beschriebene Weise aufgesetzt und in einen gusseisernen Stutzen so weit eingeführt, dass nur der Kopf des Endverschlusses daraus hervorragt; zur Isolierung desselben von dem Gehäuse dient eine Hartgummibuchse.

Der Stutzen trägt vorn einen angegossenen Flansch mit vier Schraubenlöchern, womit er vor die Aussparungen des Kastens geschraubt wird. Zur Abdichtung wird ein Gummiring dazwischen gelegt. Die aus den Stutzen hervorstehenden Köpfe der Endverschlüsse ragen nun in den Kasten hinein, wo jedem derselben ein Anschlusskopf der Sammelschienen gegenübersteht. Der Anschluss erfolgt durch Einsetzen der Schmelzsicherungen. Alle Gummidichtungen werden mit Talg bestrichen, um ein Brüchigwerden des Gummis zu verhindern.

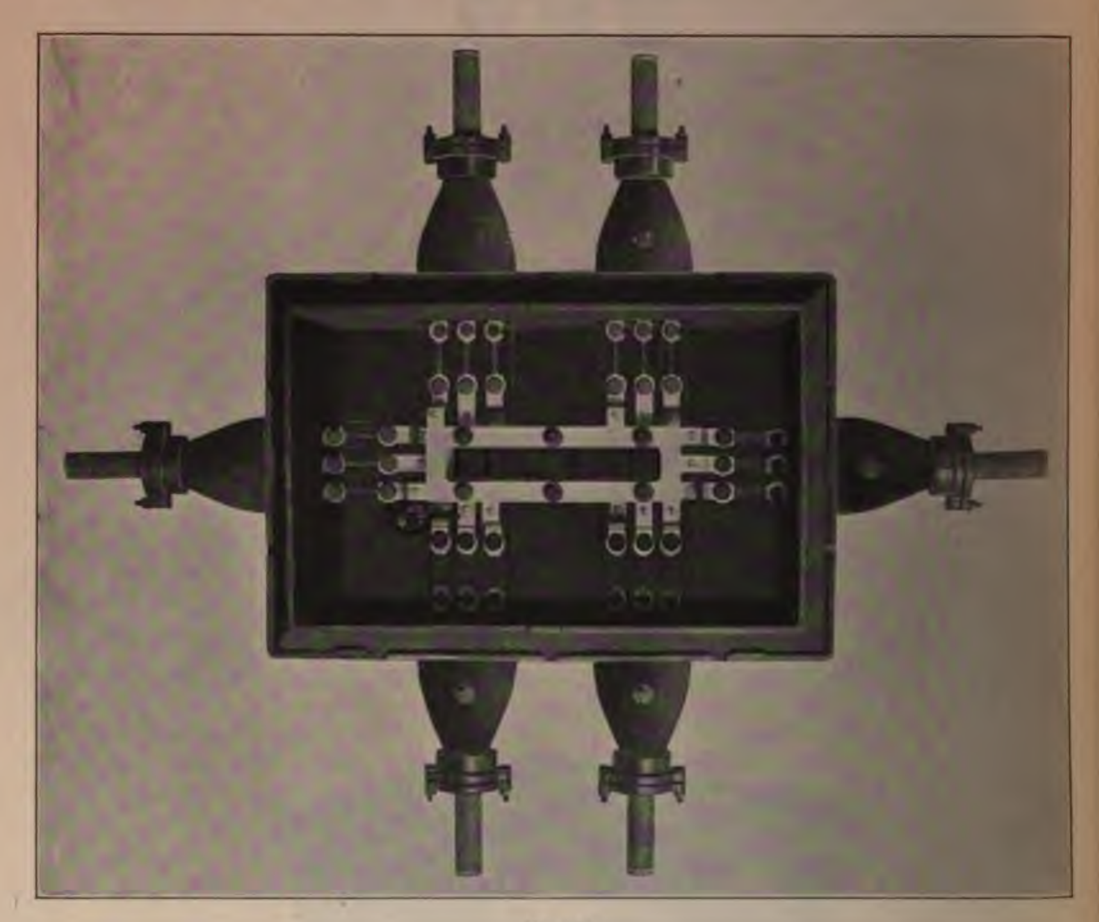


Fig. 51.

Werden nicht alle Öffnungen zur Einführung von Kabeln gebraucht, so werden sie durch Blindflansche verschlossen.

An der Aussenseite des Kastens ist etwa in $^2/_3$ der Höhe ein wagerechter Rand angegossen. Auf denselben wird der Brunnenrahmen aufgestellt; durch angegossene Knacken wird er in seiner Lage festgehalten.

Zum Verschluss des Kastens dient eine Abdeckglocke mit zurückgekrempten Rändern (Fig. 50a). Dieselbe ist nach dem Prinzip der Taucherglocke konstruiert. Ein Eindringen des Wassers von oben ist daher unmöglich. Der Vorteil dieses Verschlusses liegt darin, dass beim Öffnen des Kastens keine Schraube gelöst zu werden braucht und daher kein Zeitverlust entsteht.

Zum Ausheben der Abdeckplatte ist dieselbe mit einer Aushebevorrichtung versehen. Diese besteht aus einem in einen Schlitz eingegossenen Stück Rundeisen, welches von dem Haken des Plattenhebers gefasst wird. Dieser besteht im wesentlichen aus einem Hebebaum mit einem darauf verschiebbaren eisernen Ring, Kette und Haken.

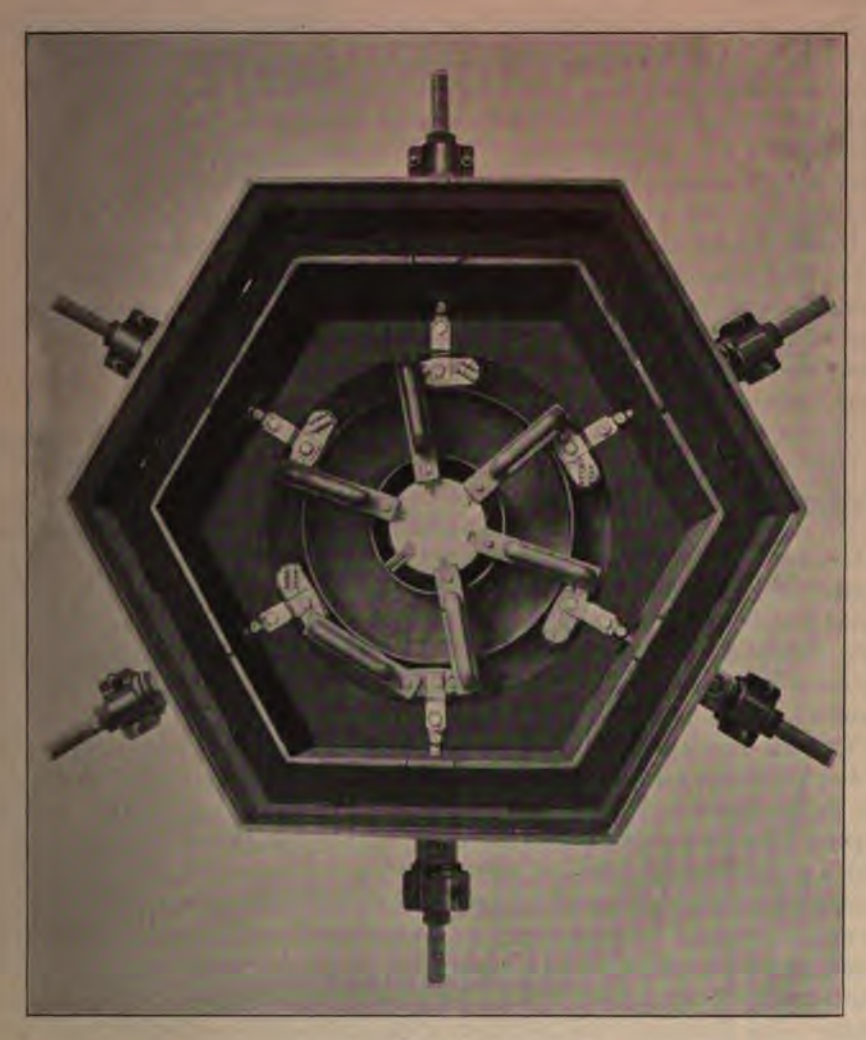


Fig. 52.

Die Kästen müssen ein gemauertes Fundament von drei Lagen Mauersteinen erhalten; damit sie unbeweglich auf demselben ruhen, werden sie mit Mörtel untergossen.

Die Ebene der Fundamente muss zur Strassenfläche genau parallel liegen, damit der Brunnenrahmen an keiner Stelle über das Strassenpflaster hinausragt.

Der Stutzen besteht aus dem gusseisernen Schutzgehäuse und dem Endverschluss aus verzinntem Messing. Das Gehäuse besitzt hinten eine Erweiterung zur Aufnahme eines zweiteiligen, konischen Spannringes mit

Flansch zum Einklemmen des Kabels. Vorn ist es mit einer zylindrischen Ausbohrung zur Durchführung des Endverschlusses versehen. Ausserdem trägt es vorn einen viereckigen Flansch, mit welchem es an den Kabelkasten festgeschraubt wird. In der Mitte oben befindet sich das Eingussloch für die Füllmasse, welches wie bei den Muffen durch einen Gewindestöpsel verschliessbar ist.

Der Endverschluss hat die Form eines mehrfach abgesetzten Zylinders. Er ist in $^2/_5$ seiner Länge für die Montage auseinanderschraubbar. Zum leichteren Verständnis soll der vordere Teil mit den angefrästen Flächen „Kopf", der hintere Teil „Schaft" heissen. Die vordere Fläche dient als Kontaktfläche für die Sicherung, dieselbe wird durch eine Schraube mit Sechskantkopf aufgeschraubt. In das Gewindeloch der zweiten Fläche wird ein Hartgummistöpsel, welcher oben eine Prüfdrahtklemme trägt, eingesetzt. Zur Durchführung des Prüfdrahtes ist der Stöpsel der Länge nach durchbohrt. Bei Verwendung von Kabeln ohne Prüfdraht wird das Gewindeloch für den Hartgummistöpsel durch eine Schraube mit flachem Kopf verschlossen. Schaft und Kopf sind bis zum Gewindeloch des Hartgummistöpsels, teils wegen der Durchführung des Prüfdrahtes, teils zum Eintreiben des Dornes in die Kabelseele, der Länge nach durchbohrt.

Der hintere Teil der Durchbohrung des Schaftes ist, wie bei den Klemmen der Verbindungsmuffen, zur Einführung der Kabelseele nach der Mitte zu konisch erweitert.

Bei den Endverschlüssen stärkerer Querschnitte ist in die Innenwand der konischen Ausbohrung zur Führung des Prüfdrahtes eine Längsrille eingefräst. Bei schwächeren Querschnitten befindet sich diese Rille an der Aussenseite des Schaftes und endigt in einem schräg nach innen führendem Loch. Damit die beiden miteinander verschraubten Teile des Endverschlusses sich nicht lockern können, wird am Zusammenstoss derselben radial eine kleine Schraube eingeschraubt.

Für die Montage wird nun zunächst das einzuführende Kabelende wie bei den Verbindungsmuffen zubereitet und das freigemachte Ende der Kabelseele in die konische Ausbohrung des Endverschlusses eingeführt. Zur Befestigung wird ein konischer Dorn vom anderen Ende des Schaftes her in dieselbe eingetrieben. Darauf wird Kopf und Schaft des Endverschlusses miteinander verschraubt.

In die vordere Durchbohrung des Stutzengehäuses wird nun eine Hartgummibuchse eingeführt, welche durch eine kleine, von oben einzuschraubende Spitzschraube festgehalten wird. Dann wird um das Ende der äusseren Jutelage eine Packung aus getränkter Hanfleinwand gewickelt, der zweiteilige konische Spannring darumgelegt und das Kabelende mit dem Endverschluss so weit in das Gehäuse eingeführt, dass der Ansatz des letzteren innen an die Hartgummibuchse anstösst und der Kopf dadurch auf die richtige Länge aus der Buchse hervorsteht. In dieser Lage wird der Spannring mit dem konisch ausgebohrten Flansch vermittelst vier Schraubenbolzen festgezogen. Alsdann wird der so montierte Stutzen unter Zwischenlage eines bei der Beschreibung der Kasten bereits erwähnten Gummiringes mit den dazu vorgesehenen Schraubenbolzen an den Kasten angeschraubt.

Darauf wird der Stutzen, nachdem vorher das Gehäuse leicht angewärmt worden ist, in der üblichen sorgfältigen Weise mit Füllmasse ausgegossen und durch den Gewindestöpsel verschlossen.

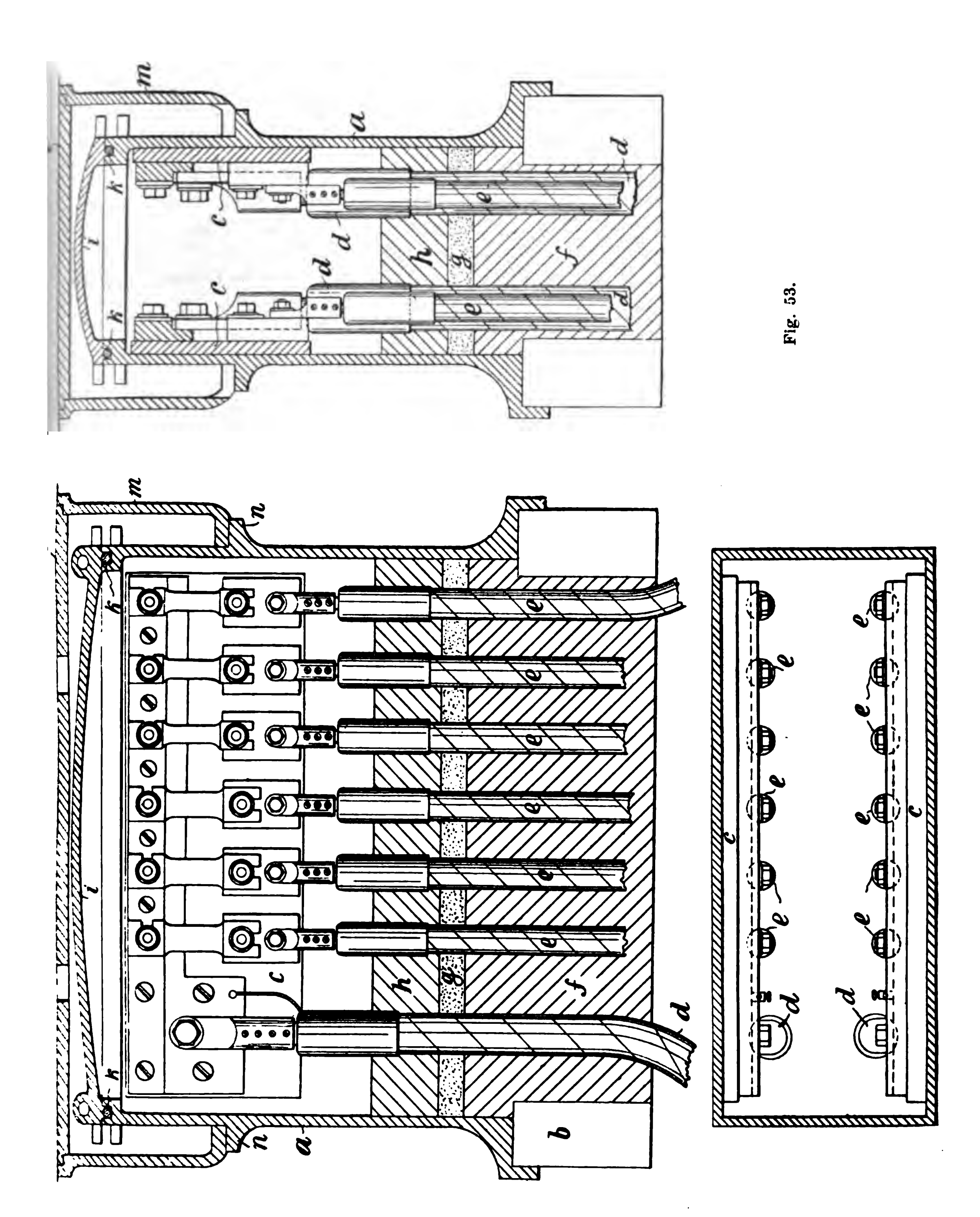


Fig. 53.

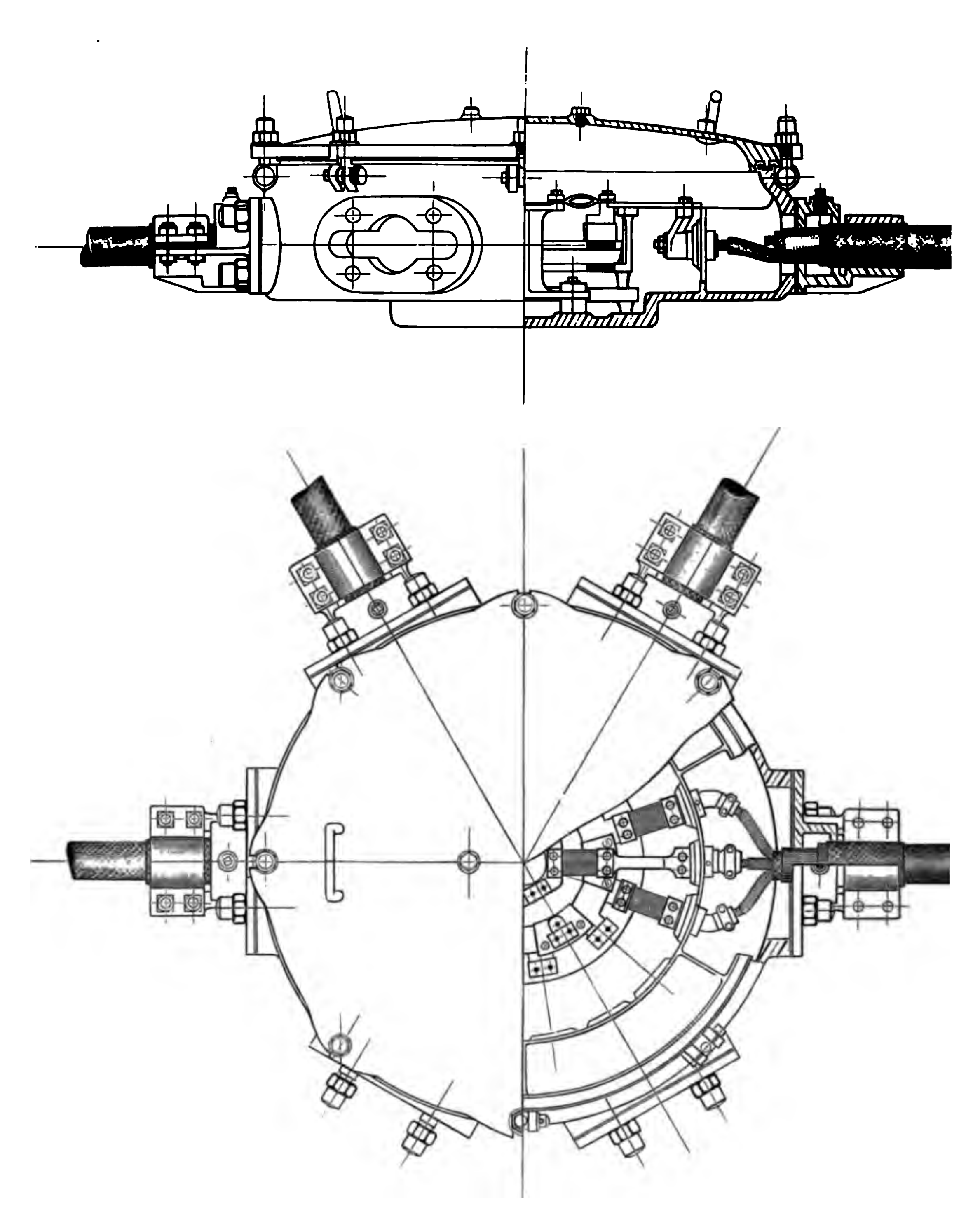


Fig. 54.

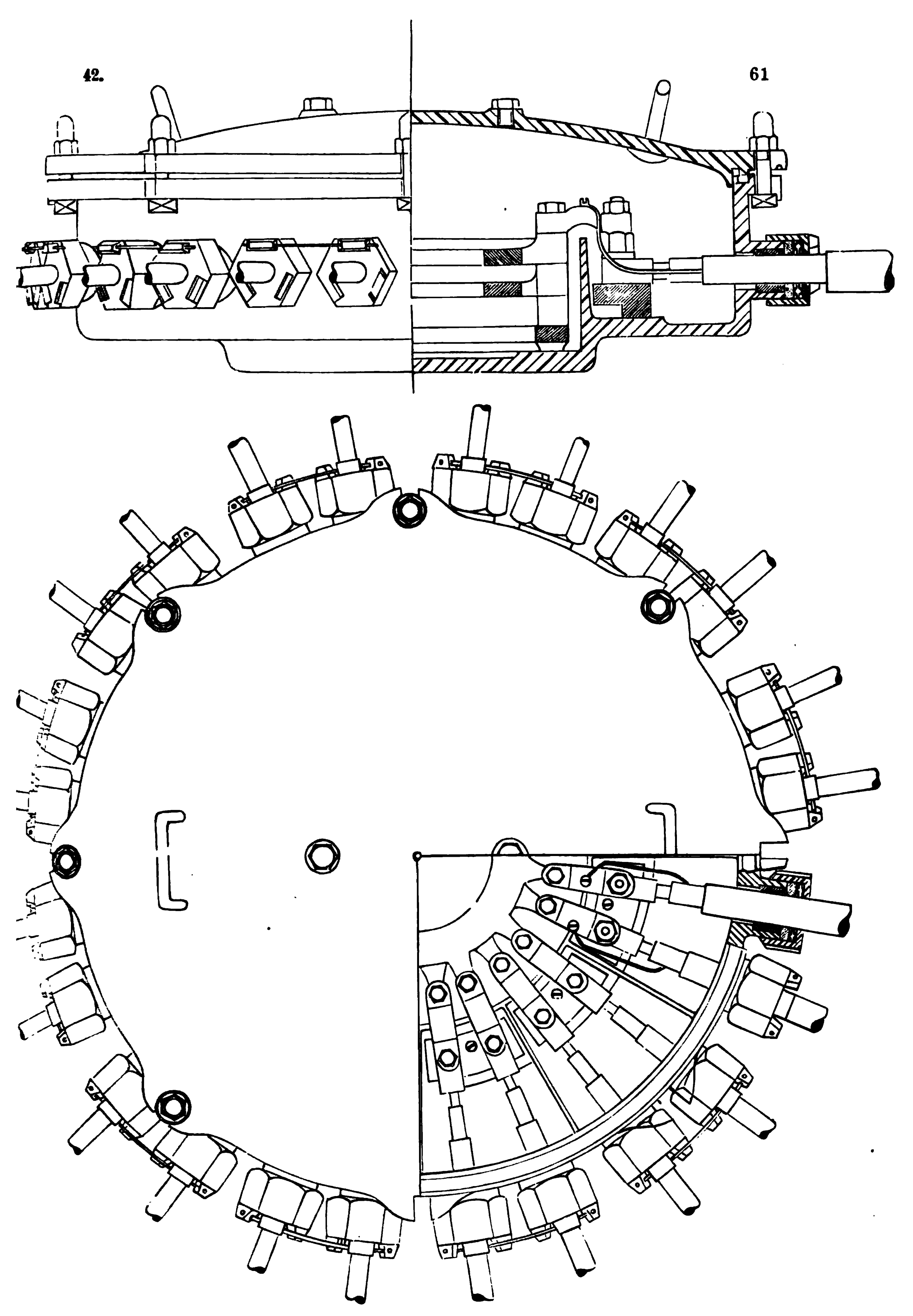
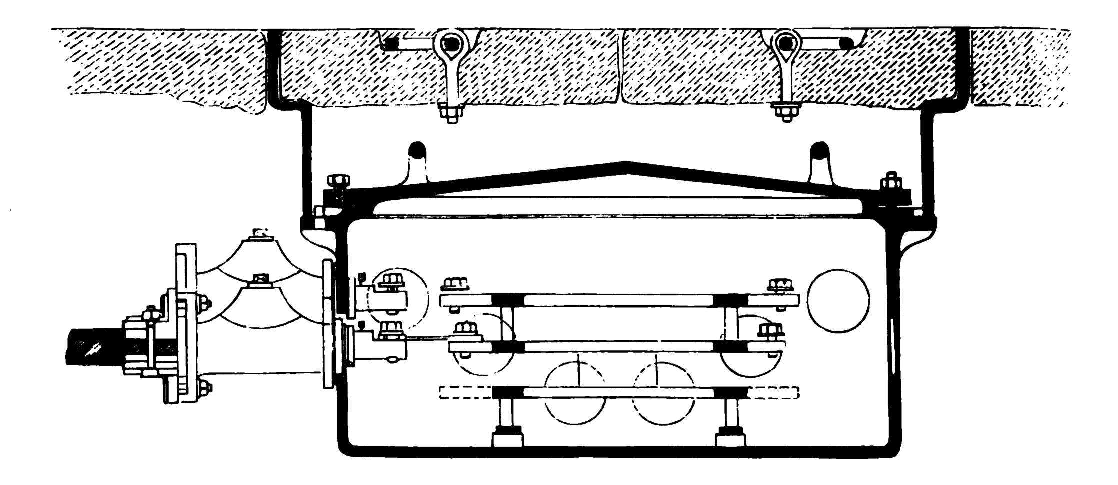


Fig. 55.



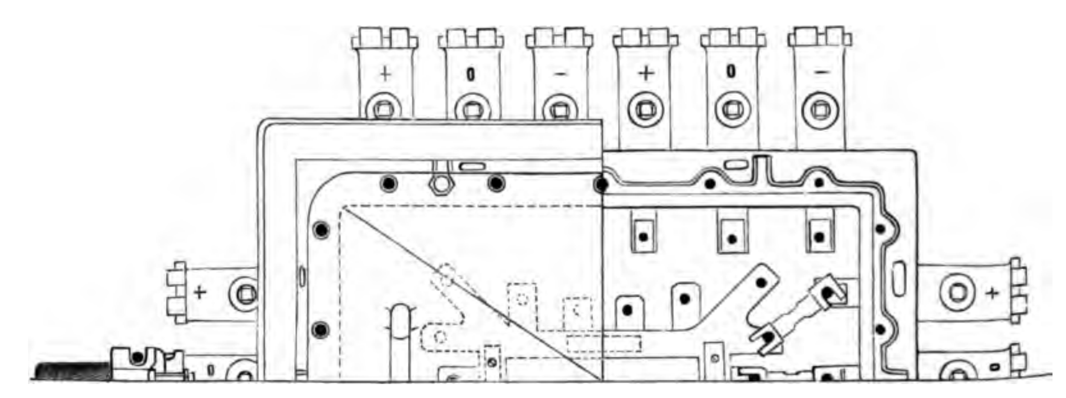


Fig. 56.

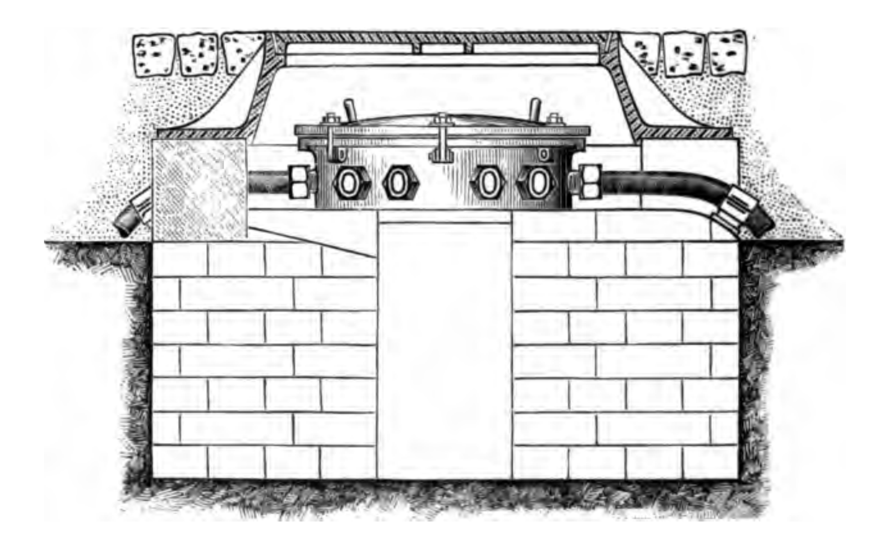


Fig. 57.

Damit keine Feuchtigkeit durch die Ausbohrung des Hartgummistöpsels der Prüfdrahtklemme in den Endverschluss eindringen kann, ist die Ausbohrung ebenfalls aber mit Paraffin auszugiessen.

Fig. 51 zeigt noch einen Kabelkasten für Drehstrom und Fig. 52 einen sechseckigen Kasten, dessen Einrichtungen gestatten, die Kabel mit Hilfe umschaltbarer Sicherungen beliebig miteinander zu verbinden. Beide Konstruktionen werden von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft ausgeführt; die Figuren erläutern sich selbst.

43. Kabelkästen der Süddeutschen Kabelwerke und von Felten & Guilleaume.

Fig. 117/118[1]) giebt einen Kabelkasten der Süddeutschen Kabelwerke Mannheim wieder, der für Drehstrom bestimmt ist und durch die Anordnung der Sammelschienen auffällt. Die Stutzen sind zweiteilig, sie werden nach der Montage ausgegossen. Bei der wiedergegebenen Anordnung lösen sich die dreifach verseilten Kabel innerhalb des Stutzens in Einzelstränge auf, die unter Zwischenschiebung geeigneter Isolierteile die Kastenwand durchbrechen. Die Verbindung zwischen den Endverschlüssen und den Sammelschienen wird durch blankes Kupfer vermittelt.

Fig. 58.

Ganz abweichend von den bisher wiedergegebenen Konstruktionen präsentiert sich der Kabelkasten der gleichen Firma, der in Fig. 53 gezeigt ist. Er ist senkrecht angeordnet, die Kabel treten von unten ein, und zwar so, dass die verschiedenen Pole auf verschiedenen Seiten des Kastens sitzen. Der untere Teil des Kastens wird aufgemauert und der wasserdichte Abschluss durch Kabelmasse erreicht.

Ein 6 Wege-Kabelkasten für dreifach verseilte Kabel von Felten & Guilleaume wird in Fig. 54 wiedergegeben. Er zeichnet sich durch besonders gedrungene Form aus, enthält Sicherungen und wird nur in seinem äusseren Teil ausgegossen.

Interessante Einführungen zeigt der Kabelkasten für 12 × 2 Einführungen der gleichen Firma, Fig. 55, die nach Art der Stopfbüchsen ausgebildet sind.

Der Einbau der Kabelkästen erfolgt so, dass der obere Teil des Schachtabschlusses mit dem Pflaster bündig steht. Fig. 56 zeigt eine Abdeckung

1) Siehe Tafel am Ende dieses Bandes.

mit Steinen, Fig. 57 eine solche mit gusseisernem Rahmen und Abdeckplatte[1]), wie sie bei FELTEN & GUILLEAUME üblich ist.

44. Ausschaltbare Kabelarmaturen.

Wie aus den vorstehenden Beschreibungen hervorgeht, wird Wert darauf gelegt, an gewissen Stellen die Kabel streckenweise abzuschalten. In der Regel erfolgt dies in den Kabelkästen unter Benutzung der Sicherungseinsätze, während die verschiedenen Muffen, mit Ausnahme der Abzweigmuffen mit Sicherung (Fig. 49), keine Konstruktionsteile zeigen, die ein Abschalten gestatten. Bei den Kabelkästen ist es erforderlich, die mehr oder weniger sicher befestigten Deckel zu öffnen, ehe es möglich ist, die Ausschaltevorrichtung zu bedienen. Mitunter, z. B. bei starkem Frost, kann diese an und für sich einige Zeit beanspruchende Arbeit sehr zeitraubend werden.

Vielfach hat man daher darauf hingearbeitet, Armaturen zu schaffen, die von aussen bedient werden können, ohne dass es erforderlich wäre, sie zu öffnen. Erwähnt seien die folgenden Konstruktionen; da sie indessen praktische Erfolge bisher nicht zu verzeichnen hatten, sei nur kurz auf die in Frage kommende Litteratur hingewiesen.

Es sind dies die Schutzkästen von H. J. Moos[2]), die ausschaltbaren und mit Sicherungen versehenen Muffen von J. SCHMIDT[3]), die abschaltbaren T-Muffen der E.-A. vorm. SCHUCKERT & Co.[4]) und schliesslich die abschaltbaren Muffen von H. EDMUNDS.[5])

Statt dieser Anordnungen hat man, wie aus Fig. 58 hervorgeht, auch hinter die Muffen *B* in die Abzweigleitungen besondere Schaltkästen *A* gelegt[6]), deren Deckel mit dem Pflaster abschneidet. Von dort werden die Leitungen in das Haus zur Sicherung *C* geführt.

Verbindungen an Drähten.

45. Feste Verbindungen.

Die einfachste Verbindung zwischen zwei Leitern geschieht durch einfaches Zusammenwürgen der Enden und Verlöten dieser Würgestelle. Diese Methode verwendet man bei Drähten bis 4 mm² (Fig. 59).

Eine andere Verbindungsart von dünnen Drähten zeigt Fig. 60. Die beiden Drähte werden so übereinandergelegt, dass zwischen den beiden

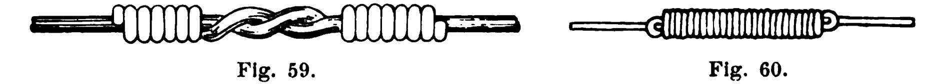


Fig. 59. Fig. 60.

Umbiegestellen ein längeres Stück beider Drähte frei bleibt. Die beiden Endstücke werden so lang gewählt, dass sie nach ihrer Umwickelung genau bis zur Mitte reichen und dort zusammenpassen.

Bei Drähten über 4 mm² Querschnitt werden, wie Fig. 61a u. b zeigen, die beiden Drahtenden rechtwinkelig abgebogen, dann auf etwa 7—8 cm und zwar so nebeneinandergelegt, dass die Drahtenden nach aussen liegen, hierauf in dieser Lage mit einer Klemme oder Feilkloben zusammengehalten

1) Die Montage eines runden Kabelkastens zeigt Fig. 7 der ETZ 1901, S. 429.
2) E. A. 1902, S. 1902.
3) E. A. 1902, S. 1805, 1901. 1986.
4) E. A. 1902, S. 1962.
5) E. A. 1902, S. 2409.
6) MOMMERQUÉ, Contrôle des installations électriques, Paris 1904, Verlag von Béranger, Fig. 160.

und durch einen Bindedraht, welcher aus demselben Material wie der Leitungsdraht hergestellt ist, umwickelt. Wenn der Raum zwischen beiden Drahtenden ausgefüllt ist, wird die Verbindungsstelle verlötet.

Dazu müssen die beiden Drahtenden mit Glas- oder Schmirgelpapier sauber gereinigt werden, die Lötmasse muss die ganze Verbindungsstelle durchdringen.

Zum Löten dürfen keine Lötmittel verwendet werden, welche das Metall angreifen, also auf keinen Fall Säure, zweckmässig kann Kolophonium oder Stearin in Anwendung kommen. Es ist vielfach Lötzinn in Röhrenform hergestellt worden, welches gleich das Flussmittel (meistens Kolophonium) enthält. Es hat sich ganz gut bewährt. Das beste Lötzinn besteht aus drei Teilen Zinn und einem Teil Blei.

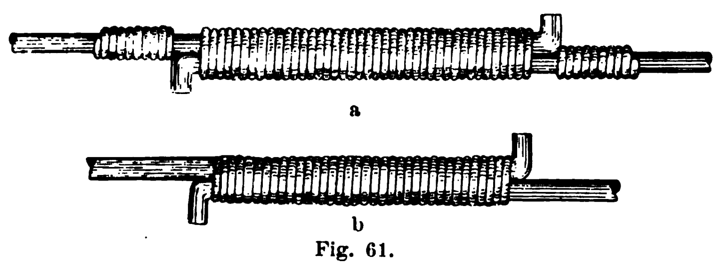
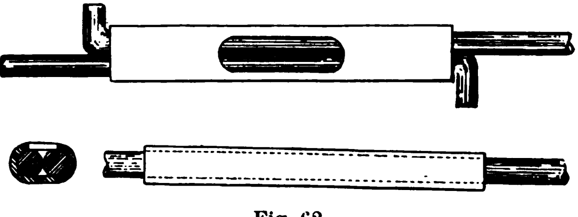


Fig. 61.

Um die Arbeit des Umwickelns zu ersparen, hat man eine flache Hülse über die beiden blank gemachten Drähte geschoben und diese an beiden Seiten umgebogen, wie es Fig. 62 zeigt. Durch die in der Abbildung sichtbare Öffnung wird dann flüssiges Zinn bezw. Lötzinn eingefüllt.


Fig. 62.

Die Lötarbeit wird teils mit dem Lötkolben, teils mit der Lötlampe ausgeführt, und zwar wird meist die letztere dem Kolben vorgezogen. Es ist streng darauf zu achten, dass die Lötstelle sachgemäss hergestellt wird, d. h. das Lot muss gleichmässig über die ganze Verbindung verteilt sein. Sie darf nicht unvollkommen mit Lot überputzt werden, da dieses sonst abspringt und die Verbindungsstelle durch Oxydation schadhaft wird. Ferner darf man bei diesen Arbeiten nicht mit dem Lötkolben oder der Stichflamme über den Bund hinausgleiten, da hierdurch leicht der Draht selbst weichgeglüht und so eine Stelle geschaffen werden kann, welche bei erster Gelegenheit reisst.

Als eine dem Verlöten gleichwertige Verbindungsart ist der Drahtbund nach Heinrich Arlt, dessen Fabrikation und Verkauf die Firma Dr. Schmidmer & Co. in Nürnberg übernommen und die Patente des Herrn Arlt erworben hat, anzusehen (Fig. 63). Diese Drahtverbindung wird ohne Lötung mittels eines Bronzeröhrchens in der Weise hergestellt, dass man letzteres über die zu verbindenden Drahtenden schiebt und das Ganze zusammendreht. Zu diesem Zweck verwendet man am besten eine besonders konstruierte Zange (Fig. 63 e), doch kann man auch gewöhnliche Zangen, Feilkloben u. dergl. verwenden. Zweckmässig werden dann die Enden noch zurückgebogen.

Die Bronzeröhren haben die folgenden Dimensionen:

für Leitungen von	1·5 mm ∅;	Wandstärke	0·5 mm;	Länge	80 mm
„ „ „	2·0 „ „;	„	0·5 „;	„	100 „
„ „ „	3·0 „ „;	„	0·6 „;	„	150 „
„ „ „	4·0 „ „;	„	0·8 „;	„	200 „
„ „ „	5·0 „ „;	„	0·8 „;	„	250 „

Bei Leitungen von grösseren Querschnitten (über 16 mm²), welche meistens aus mehreren Drähten bestehen, empfiehlt sich das in Fig. 64 dargestellte Verfahren. In reichlich bemessener Entfernung von den Leitungs-

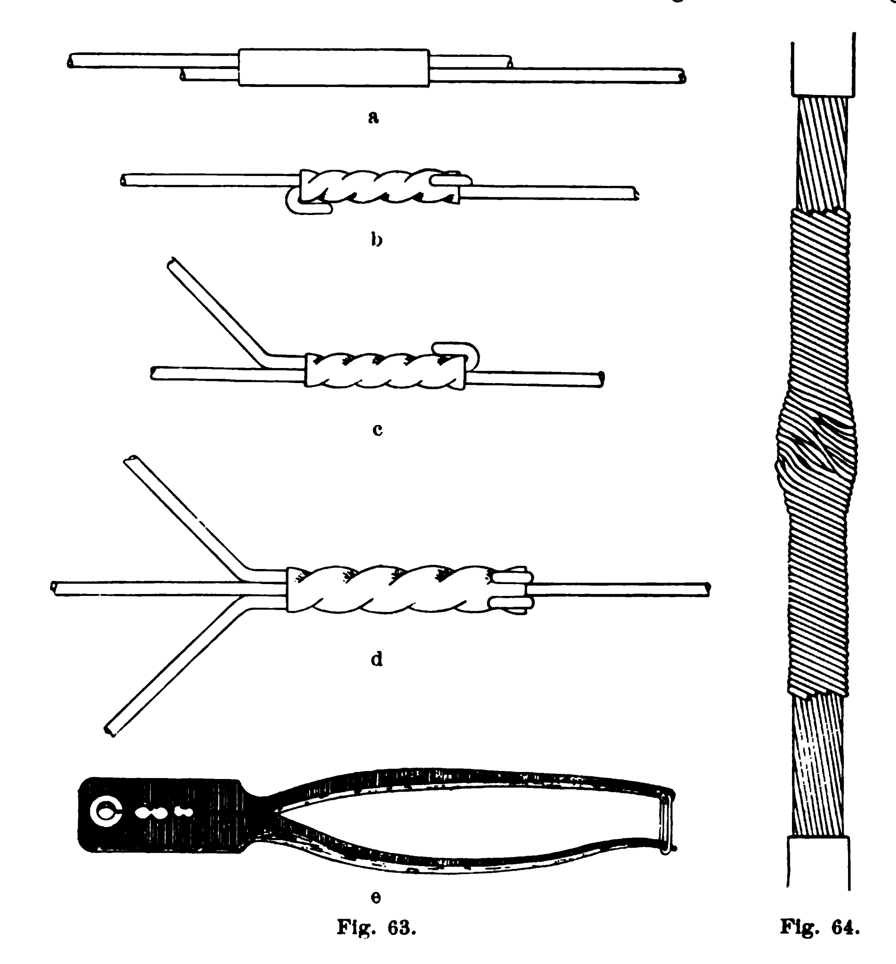


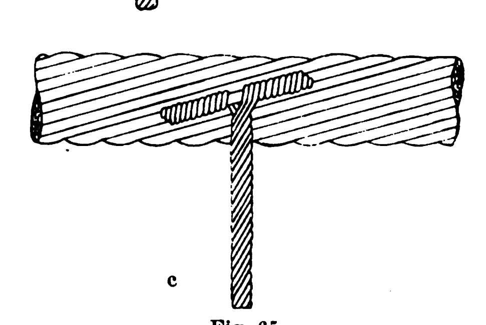
Fig. 63. Fig. 64.

enden biegt man die Drähte der Decklage nach rückwärts um. Die Drähte der Grundform[1]) werden etwa 60 bis 100 mm vom Ende abgeschnitten, so dass sie kürzer als die oberen Drähte bleiben; die zurückgebogenen Enden der Deckdrähte werden sorgfältig mit Schmirgelleinen gereinigt. Dann nähert man die zu verbindenden beiden Leitungen einander so, dass die Schnittflächen der Kerndrähte sich möglichst berühren, biegt die Deckdrähte wieder nach vorn und steckt sie so durcheinander durch, dass immer ein Draht der einen Leitung zwischen zwei Drähten der anderen liegt. Endlich windet man

1) Vgl. Hdb. VI, S. 7.

die Deckdrähte jeder Leitung fest um die Kernlitze der anderen Leitung, wie aus der Zeichnung zu ersehen. Das Zusammenlöten der Drähte der Verbindungsstelle geschieht am besten in der Weise, dass man in die Zwischenräume kleine Zinnstücke steckt und auch das nötige säurefreie Lötwasser daran thut. Um ein Abfliessen des Lötzinnes zu verhüten, umwickelt man die Verbindungsstelle mit etwa 1 mm dickem, verzinnten Kupferdraht, den man gegen die Mitte etwas weitläufiger wickelt, um etwa noch verbleibende leere Räume später mit Zinn ausfüllen zu können.

Ähnlich wie die Verbindung zweier Leitungen können auch die Abzweigungen hergestellt werden. Handelt es sich um massive Drähte, so kann gut eine der in Fig. 61—63 gezeigten Arten Anwendung finden. Der abzweigende Draht kann aber auch, wie es Fig. 65a zeigt, um die durchgehende Leitung gewickelt und dann verlötet werden. Sind beide Leiter litzenförmig, so wird der abzweigende geteilt und die eine Hälfte rechts, die andere links um das Seil gelegt (Fig. 65 b). Soll von einer sehr starken Litze aus ein schwaches Seilchen abgehen, so findet die in Fig. 65 c gekennzeichnete Art Anwendung.



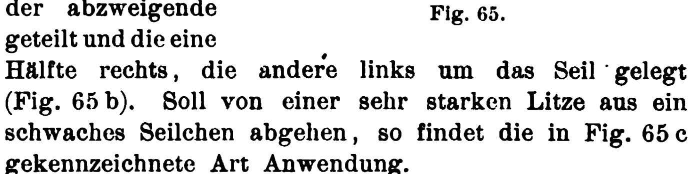


Fig. 65.

Die Lötung wird vielfach gern vermieden, hauptsächlich bei der Verlegung von Freileitungen und es werden statt dessen die Leitungen auf mechanischem Wege fest miteinander verbunden. Im Nachfolgenden seien einige dieser Konstruktionen beschrieben.

Die in Fig. 66 dargestellte Leitungsverbindung lässt sich für alle Sorten von Leitungen verwenden. Hauptsächlich dürfte diese Verbindungsart bei Aluminiumleitungen Anwendung finden, da das Löten solcher Leitungen mit Schwierigkeiten verbunden ist. Das Verbindungsstück hat die Form eines hohlen Doppelkegels, dessen Mantel an einer oder zwei sich gegenüberliegenden Stellen eine ovale Öffnung hat. Die beiden Leitungen werden je auf einer Endöffnung hinein- und durch die

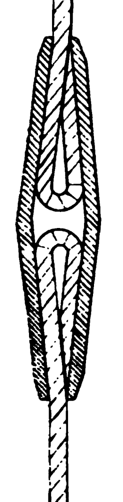


Fig. 66.

mittlere Mantelöffnung in den Doppelkegel gepresst. Durch starkes Ziehen an den Leitungen werden die hineingesteckten Leitungsenden stark zusammengedrückt. Zur Erzielung eines guten Kontaktes wird dann noch in die Mantelöffnung flüssiges Lot gegossen.

Von HOFMANN wird eine Verbindung elektrischer Leitungen durch Nietung angegeben, die darin besteht, dass die beiden zu verbindenden Drähte in eine flache, mit zwei Ausbuchtungen (Fig. 67) versehene Hülse aus nahtlosem Kupferrohr gesteckt werden. Im Mittelpunkt der kreisförmigen Ausbuchtung befindet sich in dem Verbindungsstück je eine Öffnung *B*, durch welche nunmehr ein Dorn *A* (Fig. 68) derart zwischen den beiden in die Hülse eingesteckten Leitungen hindurchgetrieben wird, dass sich die Leiter ebenfalls ausbiegen und dicht an die inneren Wandungen des Verbindungsstückes anlegen. In die hierdurch in der Mitte entstandenen Zwischenräume werden quer durch die Hülsen gehende Nieten eingeführt, welche die Drähte in ihrer ausgebogenen Lage erhalten und deren Streckung verhindern. Der Kontakt wird einesteils durch die Nieten, welche sich beim Hämmern stauchen und sich zwischen die Drähte einklemmen, andererseits durch die Hülse, an der die Drähte ausserordentlich fest anliegen, vermittelt. Zur Herstellung der Nietverbindung bedient man sich zweckmässig einer gusseisernen Grundplatte (Fig. 68), welche ausser zwei Löchern für das Durchtreiben des Dornes auch noch zwei halbkreisförmige Vertiefungen enthält, in welche die Nietköpfe beim Vernieten eingesetzt werden.

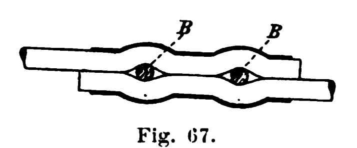


Fig. 67.

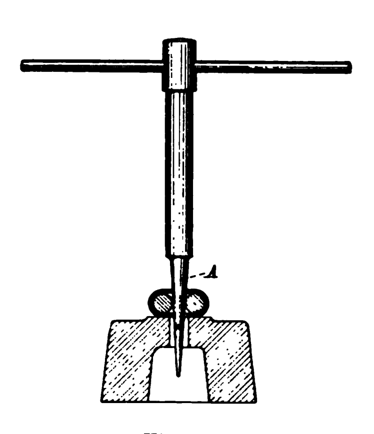


Fig. 68.

Zum Festlegen von Zweigleitungen an ein Hauptkabel bedient man sich der nachstehend beschriebenen Klammern: Ein in Form der Fig. 69 aus Blech gestanztes Stück Kupfer (oder anderes Metall) wird mit seinem Teil 1 zu einer runden Hülse *a* zusammengebracht, unter rechtwinkeliger Abbiegung der alsdann diametral sich gegenüberliegenden Streifen 2. Nunmehr werden die den letzteren anhängenden Stücke 3 zu Haken mit gerundetem Grund und parallel aufrechtstehenden Schenkeln umgebogen. Diese Schenkel *b c*, sowie die als obere Fortsetzung der Hülse *a* sich darstellenden, aus den Streifen 4 gebildeten Lappen *d* werden fest um das Hauptkabel gelegt, während die Hülse *a* zur Aufnahme der Seitenabzweigung bestimmt ist.

Die zur Bildung solcher Klammern erforderlichen Metallstücke sind ohne jeden Abfall, bezw. mit sehr geringem Materialverlust aus Blechstreifen auszustanzen, und zwar in der durch Fig. 69 dargestellten Weise für den Fall, dass die Durchmesser der Hauptleitung und der Abzweigungen gleichgross sind.

Die Verbindung von Leitungen ist nicht immer leicht auszuführen, zumal das Löten im Freien häufig grosse Schwierigkeiten bietet. Hauptsächlich gilt dies von grossen Querschnitten. Das Zinn fliesst nicht genügend durch, und es giebt kalte Lötstellen, die bei starkem Zug zerreissen. Bei sorgfältig ausgeführten Verbindungen ist zudem der Zeitaufwand ein sehr grosser. Um diesen Übelständen zu begegnen, wurde in neuerer Zeit ein kleines Maschinchen

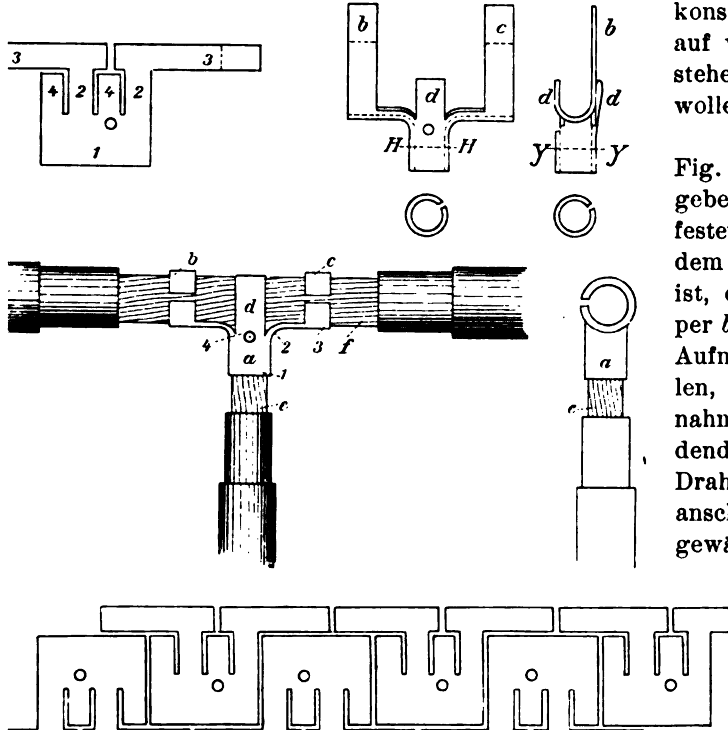


Fig. 69.

konstruiert (Syst. Heyde), auf welches wir in nachstehendem näher eingehen wollen.

Dasselbe, welches in Fig. 70 und ff. wiedergegeben ist, besteht aus dem festen Stück *c*, das mit dem Handgriff *f* versehen ist, dem rotierenden Körper *b* mit dem Ansatz zur Aufnahme der Drahtspulen, der Zange *a* zur Aufnahme der zu verbindenden Drähte und der Drahtspule *e*. Einen recht anschaulichen Überblick gewährt Fig. 71, da aus dieser die Handhabung deutlich ersichtlich ist.

Um eine Verbindung zweier Leiterenden nach dieser Methode herzustellen, werden diese mit dem Feilkloben zusammengeklemmt, nachdem sie je nach der Länge der beabsichtigten Bewickelung übereinandergelegt sind.

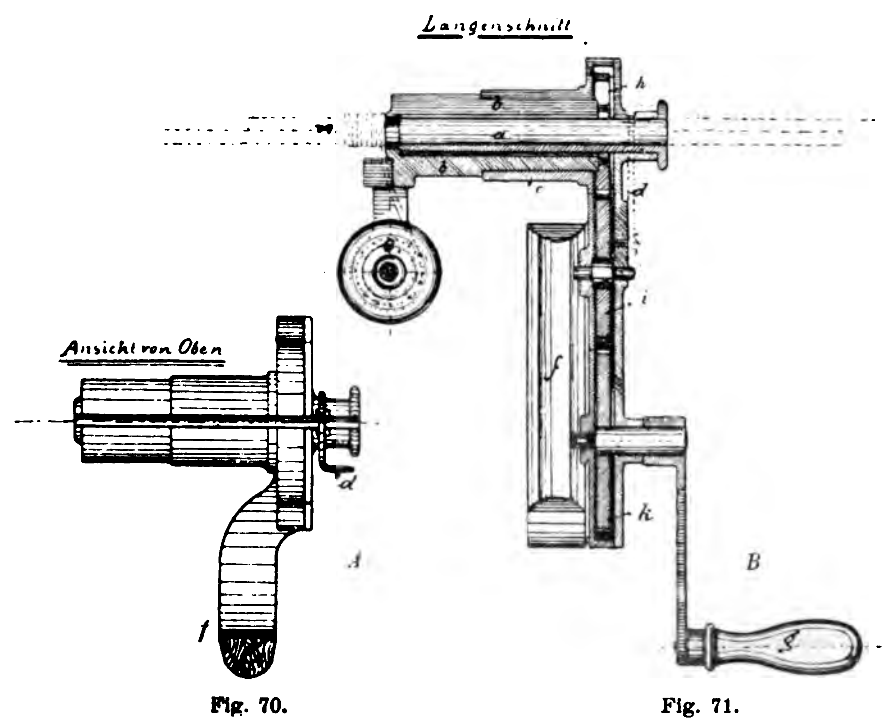


Fig. 70. Fig. 71.

Beide Drähte werden darauf in den Schlitz der Wickelmaschine, in Fig. 72 u. 73 erkennbar, eingeführt, wo sie durch einen Haken *d* gegen ein eventuelles Herausrutschen nach oben gesichert werden (Fig. 72). Nachdem man das Ende des von der Spule herabhängenden Drahtes zwei- bis dreimal um die zu verbindenden Drähte herumgewickelt hat, wird mit dem Umspinnen der Leiterenden begonnen. Es erfolgt dies ganz automatisch durch Drehen der Kurbel; hat man die gewünschte Länge erreicht, so zieht man nach Entfernung des Riegels *d* die fertige Verbindung heraus, die durch das Beseitigen der überstehenden Drahtenden einen sauberen Abschluss erhält.

Natürlich ist von besonderer Wichtigkeit, dass durch die Verbindung die Zugfestigkeit des Drahtes nichts einbüsst. Durch Zerreissproben wurde festgestellt, dass diejenige dieser Verbindung grösser war als die des Drahtes. Der Umwickelungsdraht wird mit solcher Gewalt um die Leiterenden gewunden, dass in dieselben tiefe Rillen gedrückt werden und dadurch die sicherste Verbindung, einer Verschraubung gleichkommend, hergestellt wird. Die umgewickelten Schleifen, die bei dieser Methode völlig rein bleiben, liegen dicht aneinander und bieten eine Gewähr dafür, dass Feuchtig-

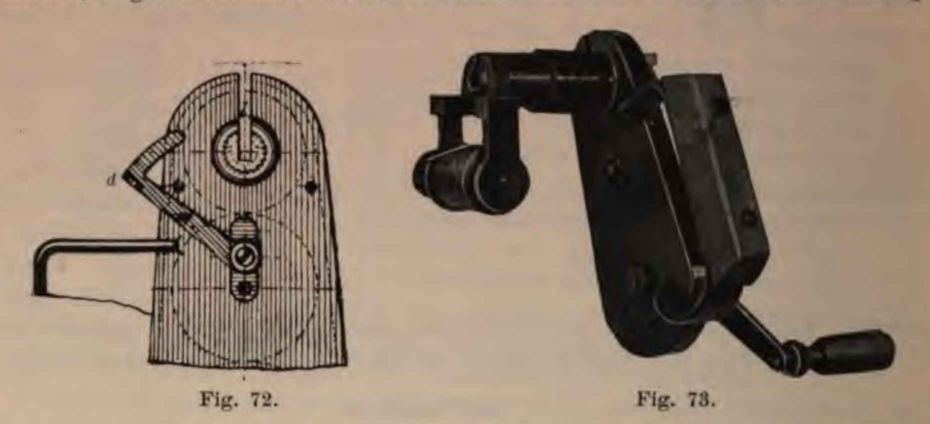


Fig. 72. Fig. 73.

keit und Oxydation den Leitungen selbst fernbleibt. Dass nun auch durch maschinellen Betrieb nicht allein Zeit, sondern auch Geld gespart wird, liegt klar auf der Hand. Während die mit der Hand hergestellte Verbindung circa eine halbe Stunde, oft noch viel länger, in Anspruch nimmt, wird diese von der Maschine in 2 bis 3 Minuten geschafft und gewährleistet ungleich mehr Sicherheit, da man bei der ersteren nur auf die Gewissenhaftigkeit der Monteure angewiesen ist. Selbst das Löten ist bei den mit der Maschine hergestellten Verbindungen unnötig. Die diesbezüglich angestellten Versuche ergaben das Resultat, dass eine Änderung des Widerstandes nicht im geringsten eintrat, auch wenn die ungelöteten Verbindungen nicht auf Zug beansprucht waren und den jeweiligen Temperatureinflüssen ausgesetzt wurden.

46. Lösbare Verbindungen. Als lösbare Verbindungen werden alle diejenigen betrachtet, die ohne Vermittelung von Feuer durch rein mechanische Mittel gelöst werden können. Sie sind ebenso wichtig, wohl noch wichtiger, wie die festen Verbindungen. Sie werden beim Anschluss an alle Apparate, aber auch bei der Verbindung von Leitungen unter sich und bei Abzweigungen angewendet. Die einfachste Verbindung einer Leitung mit einem Apparat kann dadurch hergestellt werden, dass die Leitung zu einer Öse gebogen und mittels einer durch diese gesteckten Schraube festgezogen wird. Hierbei muss die Öse jedoch

so untergelegt werden, dass ihre Öffnung durch die Drehung des Schraubenkopfes geschlossen, nicht aufgedreht wird. Zulässig ist dieser Anschluss jedoch nur für solche massiven Drähte, deren Querschnitt 25 mm² nicht übersteigt. Besteht der Leiter jedoch aus Schnüren oder Drahtseilen, so darf der grösste Querschnitt, bei welchem dieser Anschluss zulässig ist, nicht grösser als 6 mm² sein. Dabei müssen die Enden dieser Leiter verlötet sein, damit nicht einzelne Drähtchen der Litze beim Festklemmen abgeschert werden. Das Verlöten erfolgt dadurch, dass die Enden, nachdem sie sorgfältig zusammengedreht wurden, in flüssiges Zinn getaucht werden.

47. Kabelschuhe u. Klemmen für Installationsleitungen.

Alle anderen, wie die vorstehend erwähnten Leitungen, müssen mit Kabelschuhen versehen oder die Anschlussstücke derart beschaffen sein, dass eine sichere Befestigung des Leiters ermöglicht wird.

Kabelschuhe, die in gegossener oder gestanzter Form verwendet werden, werden meistens aufgelötet, seltener durch Schrauben befestigt. Das Einlöten ist mit ganz besonderer Sorgfalt vorzunehmen, damit die Isolierung der Leitung möglichst wenig beschädigt wird. Insbesondere gilt dies von den mit Gummi umpressten Leitungen.

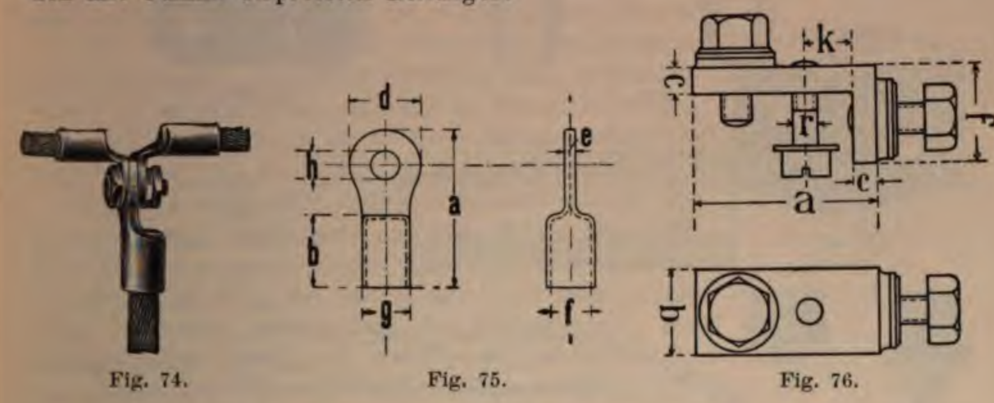


Fig. 74. Fig. 75. Fig. 76.

Während die von Siemens & Halske verwendeten Kabelschuhe aus Blechen gestanzt werden (Fig. 74), sind die von Schuckert hergestellten (Fig. 75) aus Rohr und an dem einen Ende zu einer Anschlussfläche zusammengedrückt. Wie bequem mit derartigen Kabelschuhen auch Verbindungen und Abzweigungen von Leitungen hergestellt werden können, zeigt die bei den Siemens-Schuckert-Werken übliche, in Fig. 74 wiedergegebene Art, wobei ausser geraden auch Winkelkabelschuhe verwendet werden.

Zu ähnlichen Zwecken baute Schuckert Winkelklemmen (Fig. 76) und zum Anschluss der von Verteilungskabeln abgehenden Leitungen Bolzenklemmen (Fig. 77). Um in bequemer Weise zwei Leitungen an einem Kabelschuh zu befestigen, haben Voigt & Haeffner ein Modell in der in Fig. 78 wiedergegebenen Form ausgebildet.

Muffenverbindungen, in denen die Befestigung der Leitungen mittels kleiner Spitzschrauben erfolgt, gelangen, dem Bedürfnis entsprechend, in den mannigfachsten Formen zur Verwendung; in Fig. 79 ist die Art derjenigen von Voigt & Haeffner gekennzeichnet.

Felten & Guilleaume bringen ein Verfahren zum Vereinigen von Kupferdrähten oder einer Kupferdrahtlitze mit einem Kupferstück für Schienenverbindung oder dergl. zur Anwendung, wonach über die kalt zusammengepressten Enden der Litze ein rohrförmiges Kupferstück geschoben und

dieses so zu einem festen Stück gepresst wird, dass ein Teil des rohrförmigen Stückes als Schutzhülse für die Litze erhalten bleibt, während das Ende der Litze nahezu achsial durch den Kopf hindurchragt; schliesslich wird in das Kupferstück ein Keilloch so eingepresst, dass der Pressdruck entlang der Litze geht und hierdurch mit dem überschüssigen Metall etwa vorhandene Luftteilchen nach unten zu herausgedrückt werden. Der im Kopf verbleibende Teil der Litze wird innig mit dem Metall der Kopfes verschmolzen und somit ein Anschlussstück, wie es Fig. 80 zeigt, geschaffen, welches mit der anschliessenden Leitung aus einem Stück besteht.

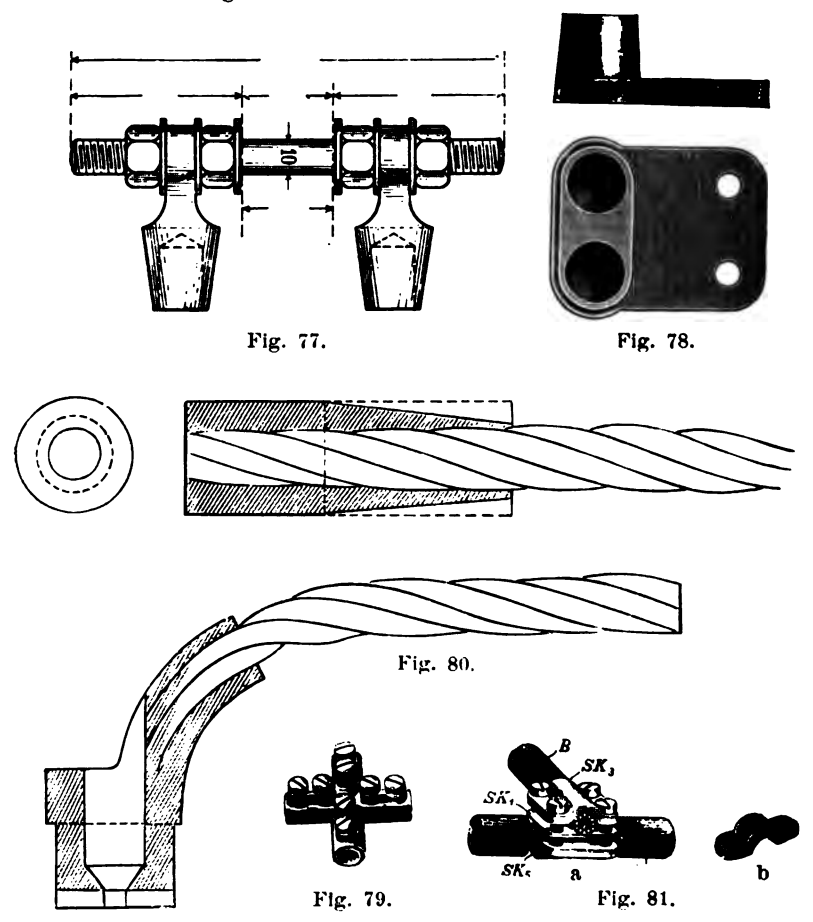


Fig. 77. Fig. 78.

Fig. 80.

Fig. 79. Fig. 81.

Die SIEMENS-SCHUCKERT-Werke verwenden Abzweigklemmen (Fig. 81), die aus zwei Schellen mit zwischenliegender Platte SK_1 bestehen, die durch vier Schrauben verbunden sind. Zwischen untere Schelle und Platte wird die Hauptleitung, in der Figur eine Litze, zwischen Platte und obere Schelle die Abzweigleitung B gesteckt und das Ganze dann durch Anziehen der vier Schrauben zusammengepresst. Besteht die Hauptleitung nicht aus einer runden Leitung, sondern aus einer Schiene — bei Verwendung einer isolierten Leitung wird die Isolierung genau in der Breite der Klemmen entfernt —, so wird statt der in der Figur sichtbaren unteren runden Platte eine andere flache verwendet. Überhaupt gestattet diese Klemme bei geeigneter Wahl der Einzelteile eine universelle Anwendung.

Wenn die abzweigenden Leitungen in gleichem Querschnitt nach beiden Seiten abgehen sollen, so werden diese ebenfalls als durchgehende Leitungen verlegt; sind die Querschnitte dagegen verschieden, so lassen sie sich nicht mit der Platte in Grösse der ganzen Klemme SK_3 befestigen, vielmehr werden

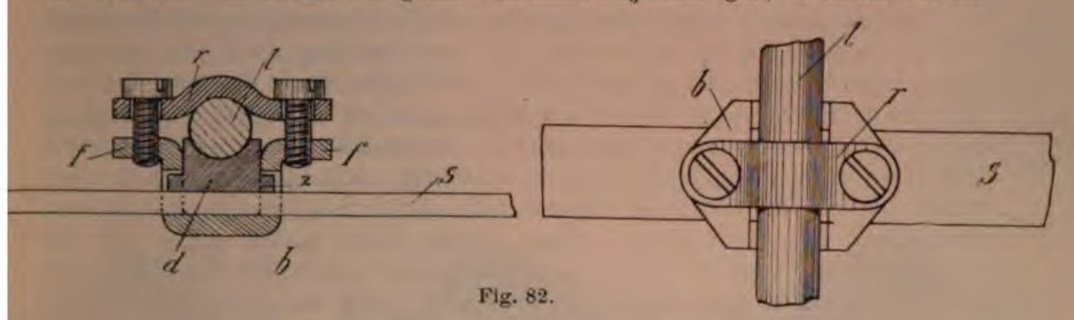


Fig. 82.

dann zwei kleinere verwendet (Fig. 81 b), deren jede unter zwei Schrauben geklemmt werden. Für stärkere Drähte und Schienen tritt an Stelle der eben beschriebenen Klemme die in Fig. 82 gezeichnete.



Fig. 83.

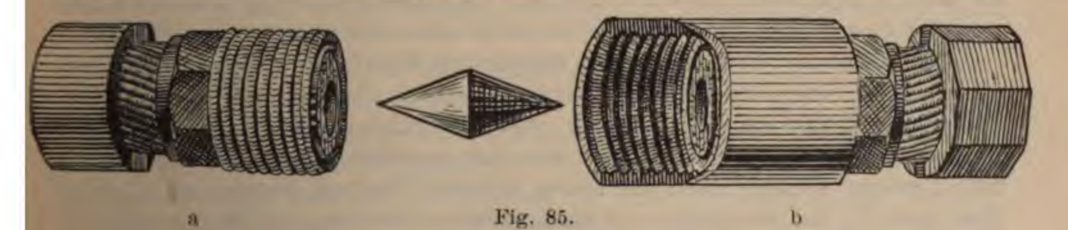
Um diese Klemmen gegen Berührung zu schützen, was ausserhalb elektrischer Betriebsräume geschehen muss, soweit die Klemmen nicht in blanke Leitungen eingebaut sind, können sie in ein Porzellangehäuse gesetzt werden, wie es in Fig. 83 gezeigt wird.



Fig. 84.

Fig. 84 zeigt eine andere Klemmverbindung der gleichen Firma. Sie besteht aus zwei Bügeln, die durch Schrauben miteinander derart verbunden sind, dass der eine Bügel auf Zug, der andere auf Druck beansprucht wird. Zwischen beiden liegt die Hauptleitung. Die abzuzweigende Leitung, an welcher ein Kabelschuh befestigt wird, wird unter der dazugehörigen Schraube festgeklemmt. Die linke Klemme ist für den Anschluss an Schienen, die rechte für den an runde Leitungen bestimmt.

Eine neue Leiterverbindung für Seile bringt die Electric Joint and Appliances Company New York auf den Markt, die in Fig. 85 ihre Erläuterung findet. Sie besteht aus zwei verschraubbaren Teilen a und b, in deren konisch nach innen verlaufende Öffnung die Leitungen



a Fig. 85. b

eingeführt werden. Vor dem Zusammenschrauben wird ein Doppelkonus so zwischen die beiden Kupferseile gebracht, dass er mit seinen Spitzen in dieselben eindringt. Beim Zusammenschrauben werden die Drähte durch diesen auseinander und somit gegen die Wandungen der Muffe gepresst. Infolge der inneren konischen Form der verbindenden Teile können die

Leitungen nicht herausrutschen, vielmehr werden sie durch auftretenden Zug noch fester angezogen. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft verwendet ebenfalls eine ähnliche keilförmige Befestigung, wie bereits auf Seite 45 beschrieben wurde.

48. Abzweigklemmen auf isolierender Unterlage, insbesondere für Schnurleitungen.

Wie an anderer Stelle auseinandergesetzt, bedingt die Verwendung eines schlecht isolierten Leitungsmaterials bei der Verlegung nach dem Peschel-schen Schnursystem eine gewisse Gefahr, aber auch durch die beim Verlöten auftretende Erwärmung können Beschädigungen der Isolierung der Schnüre eintreten, die zu Kurzschlüssen führen. Ausserdem lassen sich Lötstellen an diesen Schnurleitungen nur sehr schwierig einigermassen gefällig ausführen, da bei dem Bestreben, die Lötstelle wieder möglichst gut zu isolieren, Isolierband verwendet werden muss, dessen Farbe häufig gegen die der übrigen Leitung stark absticht, zumal die letztere, um sie den Tapeten u. s. w. anzupassen, oft in zarten Tönen gehalten wird. Auch aus dem letzten Grunde war es zu begrüssen, dass wegen der allgemein anerkannten Unzulänglichkeit der Lötstellen in Schnurleitungen das Löten überhaupt verboten wurde. Es waren somit aber Abzweigklemmen erforderlich, die sich, da alle strom-



Fig. 86.

führenden Teile auf einer isolierenden Unterlage montiert sein müssen, durchweg darstellen als Porzellanrosetten, auf denen die Metallklemmen festgekittet oder festgeschraubt sind.

Hartmann & Braun bringen mehrere Abzweigscheiben auf den Markt, die hauptsächlich dadurch wertvoll sind, dass die Abzweigklemmen durch eine besondere Porzellanschicht gegen die Hauptleitungen abgeschlossen sind. Es wird dies dadurch erreicht, dass die abzweigende Leitung in zwei Kanäle eingeschoben wird, in die die Metallteile der Klemmstücke hineinragen (Fig. 86 a).

Zum Einbau von Schaltern in festverlegte Mehrfachleitungen wurde bisher von der Sicherung zu dem Stromverbraucher eine Doppelleitung geführt und der Schalter durch Verlötung oder Verflechtung der Schnüre in den Stromkreis eingefügt. Beide Arten des Schaltereinbaues haben grosse Nachteile, welche einmal durch die früher übliche Lötarbeit bedingt sind, dann aber auch in der mühsamen und zeitraubenden Flechtung und dem damit verbundenen Materialverlust ihre Ursache haben. Diese Fehler werden durch die Anordnung der Abzweigklemmen beseitigt. Speziell zu diesem Zweck führen Hartmann & Braun eine besondere Abzweigklemme für Schalterleitungen (Fig. 86 b), und zwar wird von der Sicherung aus bis zu den zwei Doppelklemmen der Abzweigvorrichtung eine Leitung geführt. Eine zweite Leitung verbindet Ausschalter, Abzweigvorrichtung und Stromverbraucher, und zwar

wird dann in der Abzweigvorrichtung nur ein Draht dieser Leitung durchschnitten. Die so entstandenen Enden werden mit den beiden Doppelklemmen verbunden; dadurch wird die eine Drahthälfte zur Zuleitung zum Schalter, während die andere Hälfte als Rückleitung von dem Stromverbraucher zur Abzweigvorrichtung dient. Es ist dabei gleichgültig, ob vom Schalter eine oder mehrere Leitungen nach dem Stromverbraucher geführt werden.

Die SIEMENS-SCHUCKERT-Werke haben ihre Abzweigdosen nach Fig. 87 ausgebildet; bei diesen liegen die Kreuzungen in verschiedenen Ebenen. Die Abbildungen zeigen gleichzeitig die gebräuchlichsten Anwendungsformen. Die Dose wird nach der Montage der Leitungen durch einen Porzellandeckel

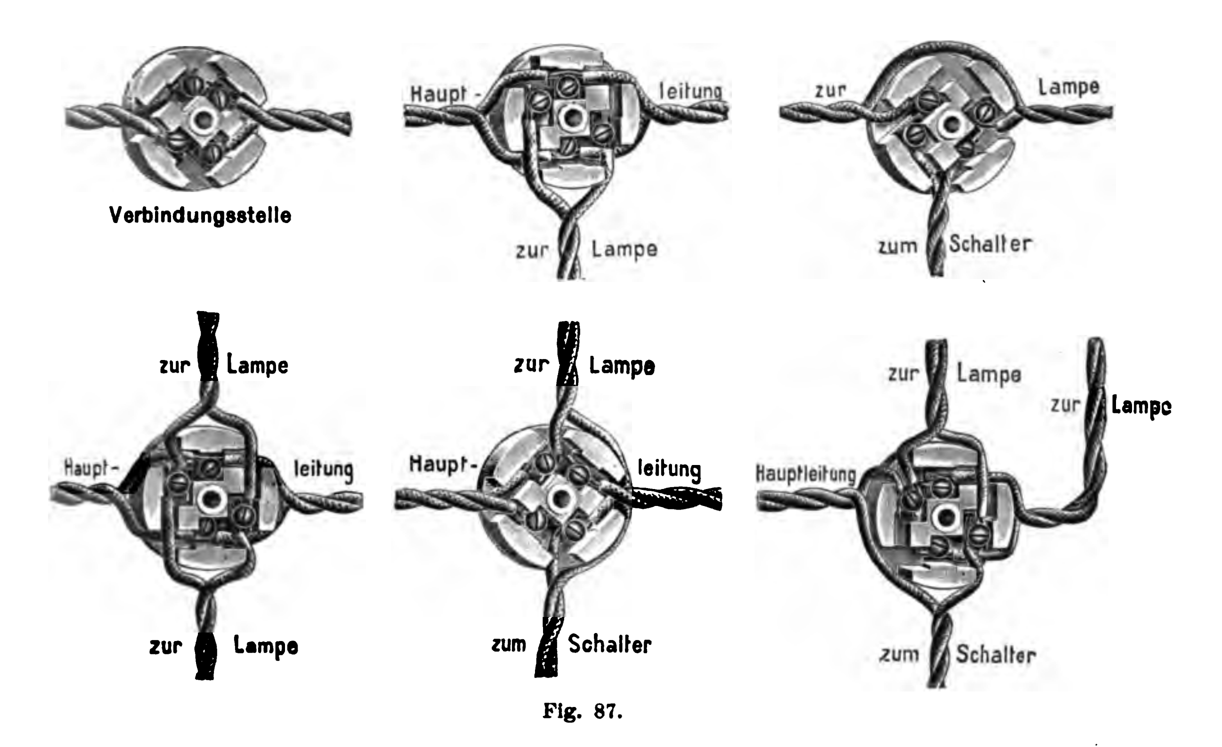


Fig. 87.

geschlossen. Der Wert dieser Konstruktion ist am besten daran zu erkennen, dass sie von den verschiedensten Fabrikanten unberechtigterweise nachgebaut wird.

Eine Abzweigklemme der Elektrizitäts-Gesellschaft RICHTER, Dr. WEIL & Co. besteht aus einigen normalen Elementen, mit deren Hilfe alle vorkommenden Kombinationen zusammengestellt werden können. Fig. 88 zeigt, wie eine gewöhnliche Abzweigstelle hergestellt wird. Um die Abzweigstelle von Zug zu entlasten, legt man eine Schleife um den Hals des Deckels und befestigt dieselbe mit Bindedraht. Soll eine doppelpolige Leitung durch eine derartige Vorrichtung verbunden werden, so werden zunächst die Leitungsenden unter die Klemme gelegt und diese in den in Fig. 88 gezeichneten Sockel eingebettet. Hierauf wird ein Porzellanzwischenstück aufgelegt und dann die Verbindung mit der zweiten Leitung mit einer gleichen Klemme hergestellt. Den Schluss bildet dann der Deckel. Erforderlichenfalls können beliebig viele derartige Abzweigstellen übereinandergebaut werden.

Die Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. SCHUCKERT & Co. in Nürnberg verwendete eine Abzweigklemme, deren Unterteil mit seitlichen Rinnen versehen ist. Der Anschluss der Leitungen erfolgt an Klemmen, welche aus

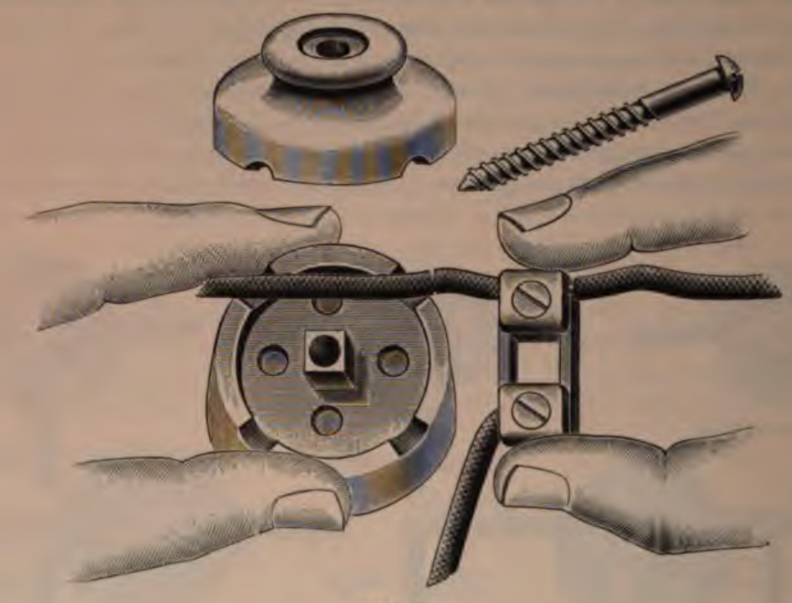


Fig. 88.

dem Porzellan hervorragen. Der Oberteil der Abzweigvorrichtung ist mit einer doppelpoligen Sicherung versehen (Fig. 89).

49. Isolierung der Verbindungsstellen.

Um die Verbindungen herzustellen, muss von den Leitungen die Isolierung abgeschält werden. Nach § 26 f der Sicherheitsvorschriften müssen diese freigelegten Stellen nach Herstellung der Verbindung wieder so geschützt werden, dass die Lötstelle ebenso gut isoliert ist, wie der ununterbrochene Draht. Es geschieht dies durch Umwickeln mit Paragummi und Isolierband. Insbesondere müssen sich die aufgetragenen Isoliermittel gut an die übrige Isolierung anschliessen, damit Feuchtigkeit nicht eindringen kann. Der Paragummi kann etwas mit Benzin angefeuchtet werden, wonach er fest aneinander klebt.

Fig. 89.

Lötstellen sind erfahrungsmässig Fehlerquellen, wenn sie nicht ganz sorgfältig ausgeführt sind; gleicher Wert muss auf die Verbindung, wie auf die Isolierung, wo sie erforderlich ist, gelegt werden.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft bringt zu diesem Zweck T-förmige aufgeschnittene Gummihülsen zum Isolieren von Abzweigstellen in den Handel, die vorzügliche Dienste leisten.

Die Verlegung der Kabel und Leitungen.

50. Geschichtlicher Rückblick.

Die Geschichte der Telegraphie ist bezüglich der Verlegung der Leitungen auch die der Starkstromtechnik. Sie ist aus verschiedenen Gründen interessant genug, um hier kurz gestreift zu werden und hauptsächlich deshalb, weil auch hieraus zu ersehen, dass von der Art der Verlegung nicht zum geringsten Teil der Erfolg einer Anlage abhängt, dass aber auch die Wahl des Materials von ausschlaggebender Bedeutung ist; beide Faktoren also gleichmässige Berücksichtigung erfahren müssen.

„Die ältesten Nachrichten über die Fortpflanzung der Elektrizität," so schreibt Wietz in seinem Buch „Die isolierten elektrischen Leitungsdrähte und Kabel", „reichen bis in das Jahr 1727 zurück, in welchem Jahre Stephan Gray die Fortpflanzung der Elektrizität durch einen in der Luft an Seidenfäden aufgehängten Draht von 700 Fuss Länge beobachtet hat. Ähnliche Versuche machte Du Fay in den Jahren 1733—1737, welcher die Elektrizität durch einen 1256 Fuss langen Draht leitete und den Ausdruck „metallischer Leiter erfand; ihm reihten sich Prof. Joh. Heinr. Winkler in Leipzig (1744), Abbé Nollet, sowie P. Joseph Franz (1746) und andere Forscher an, und im Jahre 1753 kam man auf den Gedanken, diese Eigenschaft der Elektrizität für praktische Zwecke zu verwerten und eine Art Zeichenkorrespondenz zu erfinden.

Als dieser Gedanke in die Welt geschleudert war, wurde er von vielen Berufenen und Unberufenen aufgegriffen und zur Verwirklichung dieser Idee zahllose Experimente gemacht, welche sich zum Teil auch auf die Verbesserung der Leitungen erstreckten. —

Im Jahre 1744 fasste Lesage in Genf bereits den Entschluss, die Leitungen unterirdisch in glasierten Thonröhren zu verlegen; doch diese, sowie auch die späteren Vorschläge und Versuche mussten erfolglos bleiben, da man damals nur die Reibungselektrizität kannte und eine ungeschwächte Fortleitung derselben auf grössere Entfernungen unmöglich war.

Erst als im Jahre 1801 die galvanische Elektrizität entdeckt wurde, nahmen die Versuche über deren Fortleitung einen befriedigenderen Verlauf; sie wurden von F. H. Basse in Hameln schon bis auf 4000 Fuss lange Strecken ausgedehnt und von Samuel Thomas von Sömmering in München im Jahre 1809 durch die Erfindung des ersten in der Praxis verwendeten elektrischen Telegraphen zu einem gewissen Abschlusse gebracht. Sömmering isolierte seine Leitungsdrähte mit Schellack und drehte sie zu einem Seile zusammen. Um dieses Seil ohne Elektrizitätsverlust auch unter Wasser gebrauchen zu können, bestrich er es mit in Äther aufgelöstem Kautschuk, ohne dabei zu ahnen, dass er durch dieses Verfahren den Grundstein zu einem zukünftigen grossartigen Industriezweige, der heutigen Kabelfabrikation, gelegt hatte.

' Ernster machte sich SÖMMERINGS Freund Baron SCHILLING VON CAN
an die Herstellung eines elektrischen Leitungsseiles, mit welchem ei
feuchte Erde und Wasser telegraphierte und im Jahre 1812 auch Spren
durch das Wasser ausführte. Grössere Versuche mit einer im Wass
senkten Telegraphenleitung machte SCHILLING im Jahre 1836, und diese
beinahe schon damals zur Anlage eines unterseeischen Telegraphen g

In dem Masse, als sich in der nun folgenden Zeitepoche die V
mit der elektrischen Telegraphie mehrten, trachtete man auch, die elekt
Leitungen zu verbessern, und der Gedanke, die Leitungen unterirdi
verlegen, begann um so mehr festen Fuss zu fassen, als man mit d
maligen wenigen oberirdischen Leitungen infolge der schädlichen Witt
einflüsse und der äusserst mangelhaft isolierten Stützpunkte keine
Erfahrungen gemacht hatte. — Bessere Erfolge erhoffte man sich v
unterirdischen Leitung, und es wurden zahlreiche Versuche angestellt,
anfangs grösstenteils auf das Einziehen der Drähte in isolierende Tho
Glasröhren hinausliefen."

In seinem „Lehrbuche des Galvanismus und der Elektrochemie" (l
1829, S. 269) spricht Dr. GUSTAV FECHNER, anknüpfend an die Versu
BASSE, über eine unterirdische Leitung, welche, aus übersponnenen
bestehend, ein nicht sehr kostspieliges Mittel zur Beförderung von Nacl
abgeben würde.

Der amerikanische Historienmaler, Professor SAMUEL FINLEY
MORSE, der berühmte Erfinder des in der Praxis so vielfach angew
elektromagnetischen Telegraphen, schlug Ende September 1837 glei
Stangenleitungen durch die Luft vor und gleichartig unterirdische Le
welch letztere er in eisernen Röhren, unter Umständen aber auch
röhren, verlegen wollte.

In England wurden die ersten isolierten Fernleitungen von WHE
und COOKE thatsächlich in eiserne Röhren eingeschlossen und diese
die Erde eingegraben, teils auf niedrigen Pfosten über der Erde
Der dabei verwendete Kupferdraht wurde mit Baumwolle umsponn
sorgfältig gefirnist. Aus ökonomischen Gründen, behufs vollkom
Isolierung und besserer Überwachung, verliess man jedoch dieses
wieder und ging zum Bau von Luftleitungen über.

In den folgenden Jahren tauchten abermals Vorschläge für
seeische Telegraphenleitungen auf. Die erste Leitung unter Wasser
Dr. O'SHAUGHENESSY[1]) in Hindostan ausgeführt zu haben, welcher i
1839 in der Nähe von Calcutta eine 21 Meilen lange Versuchsli
in dieser eine 7000 Fuss lange Flussleitung herstellte. Ferner
WHEATSTONE bereits 1840 beim englischen Unterhause die Versenku
Telegraphenseiles in den Kanal an, um Dover mit Calais telegrap
verbinden, welcher Vorschlag allerdings erst in den Jahren 1850 u
zur Ausführung gelangte, und im August 1843 wurde von MORSE i
Briefe an den Schatzsekretär der Vereinigten Staaten von Nordam
Herstellung einer unterseeischen Telegraphenleitung zwischen Amer
Europa beantragt.[2])

1) HIGHTON, Electric telegraph, S. 161.

2) DELAMARCHE, Elemente der unterseeischen Telegraphie, übersetzt von C.
MANN, Berlin 1859, S. 68; vgl. auch L. FÖRSTERS „Allgemeine Bauzeitung", 18.
S. 285 (Geschichte des elektrischen Telegraphen).

In Deutschland beschäftigte sich hauptsächlich der Telegraphendirektor Major OETZEL, Verwalter des optischen Telegraphen zwischen Berlin, Köln und Trier im Jahre 1833 mit Versuchen, Nachrichten elektrisch zu übertragen. FRIEDRICH WILHELM IV. veranlasste, dass OETZEL, nachdem er dem König über seine Erfindungen Vortrag gehalten hatte, 15000 Thaler zum Bau einer Versuchsstrecke Berlin-Potsdam erhielt.[1] Gleichzeitig fanden auch in München Versuche statt, andere wurden von WHEATSTONE angestellt, sie beeinflussten sich aber gegenseitig. Entsprechend der Münchener Anordnung wählte OETZEL offene Verlegung eines vierfach verseilten Eisendrahtes auf 6 m hohen Stangen, von denen der Draht durch Kautschukplatten isoliert wurde. Noch war die Versuchsstrecke nicht beendet, als OETZEL von den Erfahrungen WHEATSTONES hörte, dass oberirdische Leitungen zur Übertragung des elektrischen Stromes bei ungünstigem Wetter nicht geeignet seien, wenn sie länger als eine Meile wären. Bei der Verwendung einfacher Kautschukplatten ist dies leicht erklärlich. OETZEL liess sein Projekt fallen und beabsichtigte auf der Versuchsstrecke die Leitungen unterirdisch in Eisenrohr zu verlegen. Die hierzu erforderlichen Kosten von 30000 Thalern wurden jedoch nicht bewilligt.

Man begnügte sich, eine 12000 Fuss lange Versuchsstrecke zu bauen, indem man in den Damm der Potsdamer Bahn einen mit Kautschuk und gewachster Baumwolle isolierten Draht einbettete. WERNER SIEMENS verwendete zur gleichen Zeit selbst für grössere Strecken unterirdisch verlegten Guttaperchadraht mit verhältnismässig gutem Erfolg, solange die Leitungen neu waren. Indessen traten bald Störungen ein, die Veranlassung boten, von der unterirdischen Verlegung ganz abzugehen und dafür ausschliesslich oberirdische anzuwenden. Die Hauptursache lag in der ungenügenden Isolierung und der allzu geringen Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Verletzungen. Ausserdem war die Guttapercha in vulkanisiertem Zustand unmittelbar auf den Draht gebracht worden, wodurch nicht nur der verwendete Kupferleiter angegriffen wurde,[2] sondern auch die inneren Guttaperchaschichten kupferhaltig und somit leitend wurden, wodurch die Isolierfähigkeit beeinträchtigt wurde. Dazu betrug die Verlegungstiefe nur etwa zwei Fuss, so dass auch Witterungseinflüsse eine Verminderung der Isolierfähigkeit wesentlich herbeiführten, da die Guttapercha brüchig wurde. Die Fabrikation der Leitungen war noch nicht genügend ausgebildet, da die Guttaperchahülle häufig noch Blasen hatte und der Leiter exzentrisch in sie eingebettet war. Jedenfalls war die Summe der Fehler so gross, dass zeitweise eine Verständigung auf den einzelnen Linien überhaupt nicht möglich war und so wurde im Oktober 1851, gestützt auf die in England gesammelten Erfahrungen, vom Handelsministerium beschlossen, die Leitungen nicht mehr unterirdisch, sondern nur oberirdisch zu verlegen. Dies war um so eher möglich, als inzwischen der Glockenisolator erfunden worden war. An die Stelle des Kupferdrahtes trat der billigere Eisendraht.

Bei trockner Witterung war die Isolation zwar eine durchaus ausreichende, bei feuchter Witterung dagegen traten noch recht beträchtliche Nebenschlüsse auf, die ein Telegraphieren auf grössere Entfernung unmöglich machten. Die Ursache war auch hier noch die ungenügende Isolierung, da der einfache

---

1) Denkschrift des Reichspostamtes: „50 Jahre elektrische Telegraphie".

2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 111.

Isolator (vgl. Freileitungen) der Entweichung des elektrischen Stromes keinen genügenden Widerstand bot. Erst als bessere Isolatorentypen zur Einführung gelangten, wurde die oberirdische Leitung ein betriebssicheres Mittel zur Übertragung der elektrischen Energie. Als grosser Mangel stellte es sich noch heraus, dass die verwendeten Eisenleitungen sehr stark rosteten, mannigfache Versuche mit Überzügen von Asphaltlack oder Leinöl blieben resultatlos. Erst 20 Jahre nach Einführung der oberirdischen Leitungen wurde in der Verzinkung des Eisendrahtes ein wirksames Mittel gegen das Rosten gefunden. Bei der allgemeinen Einführung oberirdischer Leitungen konnte es in grossen Verkehrszentren naturgemäss nicht ausbleiben, dass die Anzahl der Leitungen ins Ungemessene wuchs, wodurch Unfälle vorkamen. In New-York wurden daher im Jahre 1890 alle oberirdischen Leitungen verboten.

Die unterirdische Verlegung der Leitungen gewann erst Bedeutung und Ausdehnung, nachdem WERNER SIEMENS das Bleikabel erfunden und seine Fabrikation zu grosser Vollendung gebracht hatte.[1])

Die Verlegung der Kabel.

51. Allgemeines.

Die sachgemässe Verlegung von Kabeln erfordert in erster Linie eine genaue Kenntnis des Kabels selbst und der am Ort der Verlegung herrschenden Verhältnisse. Die Verlegung muss ausserordentlich gewissenhaft und sorgfältig erfolgen, da hiervon ein gutes Arbeiten des verlegten Kabels abhängig ist.

Nach den elektrischen und örtlichen Verhältnissen ist die Konstruktion des Kabels gewählt worden, jedoch muss während der Verlegung noch nachgeprüft werden, ob nicht durch die Art der Verlegung noch ein weiterer Schutz gegen chemische oder mechanische Verletzungen geschaffen werden muss. Während schon die Verlegung der Kabel selbst grosse Umsicht erfordert, gilt dies in erhöhtem Masse von der Herstellung der Verbindungsstellen, die naturgemäss als schwache Stellen der Kabelstrecken aufzufassen sind. Wird die nötige Sorgfalt ausser Acht gelassen, so wird das Kabel entweder schon bei der Inbetriebsetzung durchschlagen, oder nach kurzem Gebrauch so verlieren, dass die Betriebssicherheit nicht mehr gewährleistet ist.

Aber nicht allein durch direkte bezw. mechanische Beschädigungen werden Kabelfehler[2]) hervorgerufen, sondern aussergewöhnliche Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse, das Vorhandensein eines salzhaltigen Bodens etc. können die ungünstigsten Wirkungen auf das Kabel ausüben. Treten die vorgenannten Mängel auf, so ist die Einbettung der Kabel in eine reichliche Menge reinen Sandes das wirksamste Mittel, oder es muss das eine oder andere der später beschriebenen besonders sicheren Verlegungssysteme zur Anwendung kommen.

Kabeldefekte können aber auch durch Montagefehler, z. B. mangelhafte Herstellung einer Kabelverbindungsstelle, fehlerhafte Montage einer Abzweig- oder Verbindungsmuffe, durch ein totgelegtes Kabelende, durch eine schlecht isolierte Anschlussleitung und schliesslich auch durch unsolide Montage eines Kasteneinführungsstutzens entstehen.

---

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 90.

2) Näheres siehe Entstehung der Isolationsfehler. Hdb. VI, 2.

Bei Abzweigmuffen und Lötstellen kann ausserdem noch durch äusseren Druck auf die Verbindungsstellen oder durch Zugbeanspruchung derselben die Entstehung von Defekten im Bleimantel sehr begünstigt werden. Man



Fig. 90.

muss daher die Verbindungsstellen durch gutes Unterstopfen derselben mit Erde oder Ziegeln entlasten.

Wenn irgend angängig, ist nach Herstellung jeder Verbindungsstelle eine Messung vorzunehmen, wie solche bei jeder Verlegung so wie so stattfindet.[1])

1) Vgl. Hdb. VI, 1: Die Messungen am Kabel.

52. Transport der Kabel.

Mit wachsendem Querschnitt sinkt die Fabrikationslänge[1]) der Kabel; dieselben werden daher nicht in bestimmten Längen, sondern in bestimmtem Gewicht versandt. Die Kabelfabriken liefern die Kabel in solcher Verpackung, dass der Transport möglichst erleichtert wird. Bei einigermassen grösseren Längen werden die früher beschriebenen[2]) Kabeltrommeln verwendet, sonst werden die Kabel in Ringe gelegt und mit Stroh verpackt. Man setze die Kabel, wenn sie nicht gleich verlegt werden können, nicht unnötigerweise lange den direkten Sonnenstrahlen aus, sondern bedecke sie mit Stroh. Auch vor den Einwirkungen zu starker Kälte müssen sie bewahrt werden. In gefrorenem Zustande ist die Verlegung auf jeden Fall unzulässig.[3])

Wenn irgend möglich, verwende man zum Abladen einen Kran (eventl. einen Dreibaum, wie Fig. 90 zeigt). In diesem Fall wird durch die gebohrte Achse des Haspels eine Welle gesteckt und an dieser die Hebetaue befestigt. Sind Ringe zu heben, so verwende man breite Gurtbänder, um jede Beschädigung des Kabels auszuschliessen. Da aber am Orte der Verlegung häufig Krane nicht zur Verfügung stehen, ihre Verwendung aber von grösster Bedeutung ist, so haben die Kabelwerke selbst besondere Transport- und Hebemittel im Gebrauch. Es sind dies besonders zweckmässige, leicht transportable Kabelkrane, Kabeltransportwagen und drehbare Verlegungsscheiben. Findet der Transport zur Verlegungsstelle auf einem gewöhnlichen Rollwagen statt, so müssen die Trommeln gut unterkeilt und die Keile festgenagelt werden; beim Abrollen der Trommeln vom Wagen muss durch ein oder zwei um den Umfang derselben geschlungene Seile die Geschwindigkeit der ablaufenden Trommel auf ein Minimum begrenzt werden.

Weit vorteilhafter ist der Transport auf einem besonderen Kabeltransportwagen, von denen zwei in den Abbildungen[4]) 91 und 92 wiedergegeben werden. Der erstere ist nur für Trommeln beschränkteren Durchmessers bestimmt, während der Wagen nach Fig. 92 solche verschiedener Grösse aufnehmen kann.

Die Trommel wird mit Hilfe der Winde k (Fig. 91) und des um ihren Umfang geschlungenen Seiles T auf den Wagen gezogen, wobei die herabgelassene Rückwand s als Brücke dient. Durch die hohle Achse wird ein Eisenstab gesteckt, der sich auf den abgeschrägten Bordwänden wälzt, bis er den Endpunkt L erreicht. Hier wird die Welle durch ein Überwurfstück festgehalten.

Auf den Wagen nach Fig. 92 wird die Trommel in ähnlicher Weise aufgebracht, ihre Achse wird aber hier dadurch festgelegt, dass die um ein Scharnier S drehbaren und mit Lagern L versehenen Schienen mit Hilfe von Schraubwinden W gehoben werden.

Bei beiden Wagen wird eine Lagerung der Trommel erreicht, welche sie zu drehen erlaubt. Dieser Umstand kommt bei der Verlegung sehr zu statten.[5])

Zu beachten ist, dass die auf den Kabeltrommeln oder Ringen aufgeschriebenen Vermerke, die sich auf Länge und Querschnitt beziehen, nicht

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 108 u. 172.
2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 108.
3) Vgl. Hdb. VI. 2, S. 90.
4) HUGO WIETZ, Die isolierten elektrischen Leitungsdrähte und Kabel, S. 112 u. 113.
5) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 83.

entfernt oder verschmutzt werden. Bei umfangreichen Kabelarbeiten können sonst leicht die unangenehmsten Irrtümer eintreten.

53. Auslegen der Kabel.

Bei Verwendung von Kabelwagen kann man, falls die Verlegung unmittelbar an oder in einer gut befahrbaren Strasse stattfindet, den Wagen gleich zum Auslegen des Kabels verwenden, indem man das Kabelende befestigt und den Wagen langsam vorfahren lässt. Da indessen diese Art der Auslegung von allerlei Zufälligkeiten abhängig ist, so wird sie kaum, und dann

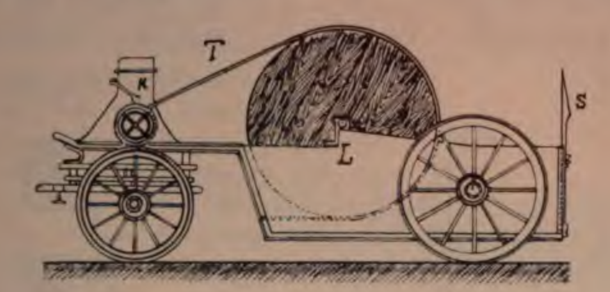


Fig. 91.

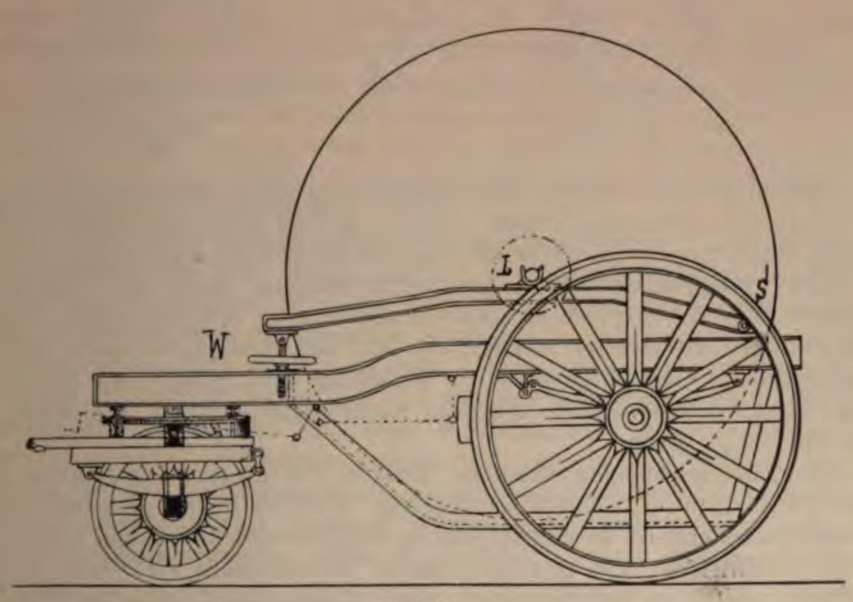


Fig. 92.

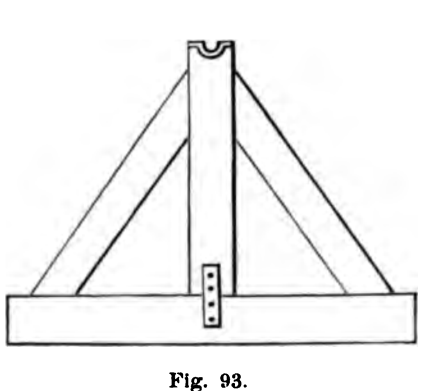
nur bei dünneren Kabeln angeordnet. Besser ist es, den Kabelwagen am Ausgangspunkt des Kabels aufzustellen und das Kabel abziehen zu lassen. Bei beiden Arten kommt die drehbare Lagerung der Trommel[1]) im Kabelwagen vorteilhaft zur Geltung.

Auch ein gewöhnliches Fuhrwerk kann zum gleichen Zweck Verwendung finden, indessen ist dann die Trommel horizontal zu lagern. In diesem Fall ist jedoch ein besonderer Kran erforderlich, um die Trommeln auf den Wagen heben zu können. Sicherer ist es aber jedenfalls, wenn kein Kabelwagen

1) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 82; vgl. Anm. 1 auf S. 88.

vorhanden ist, die Trommeln abzuladen und auf die eine der folgenden Arten drehbar zu lagern.

Man wende das Prinzip an, welches bei den Kabelwagen (Fig. 91 u. 92) zur Geltung kommt, indem man durch einige starke Balken und geeignete Unterlagen eine schiefe Ebene herstellt, auf welche die Trommel so gerollt wird, dass sie schliesslich an dem durchgesteckten Eisenstab hängt oder man lagere die Trommel auf zwei Böcke der in Fig. 93 skizzierten Art. Am einfachsten geschieht dies, indem man die Trommel auf einige Ziegelsteine rollt, die Böcke unter die Welle stellt und dann die Steine zerschlägt.



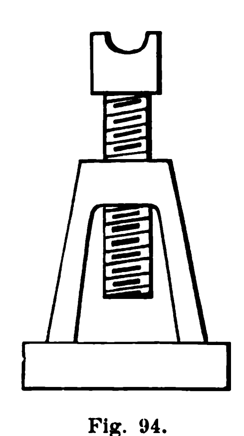




Fig. 93. Fig. 94.

Sehr bequem sind anstatt der vorerwähnten Böcke die bekannten eisernen Schraubspindeln (Fig. 94). Diese werden so tief eingestellt, dass man die Welle bequem fassen und durch Drehung der Spindel die Trommel heben kann.

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Kabelverlegung bieten die Verlegungsscheiben, die auf Fig. 90 in zwei Exemplaren zu erkennen sind. Es sind dies kräftige, zweirädrige Karren, die eine um einen Mittelzapfen drehbare Scheibe haben. Auf diese wird der Kabelring flach gelegt und die Scheibe beim Ablaufen des Kabels langsam nachgedreht, sodass das Kabel nie Schleifen bilden kann.

54. Die Anordnung der Kabel im Erdreich.

Die Zusammenlegung grösserer Mengen von Kabeln hat gewisse Nachteile. Treten in dem einen Kabelstrang Störungen auf, so kann es vorkommen, dass andere, an und für sich an dem betreffenden Defekt unbeteiligte Kabel, in Mitleidenschaft gezogen werden. Insbesondere wird dies bei Kurzschlüssen und dem Herausbrennen eines Kabelstückes stets der Fall sein, wenn die Kabel dicht aneinander liegen.

Man wird daher in erster Linie den Hauptleitungen erhöhte Aufmerksamkeit schenken und sie eventuell in besonderen Kanälen oder in einer gewissen Entfernung von den übrigen Leitungen verlegen. Die gleiche Trennung wähle man bei der gleichzeitigen Verlegung von Hoch- und Niederspannungskabeln oder von Stark- und Schwachstromkabeln (vgl. Fig. 95).

Fig. 101 stellt die Verlegung von mehreren Kabeln mit verschiedenen Spannungen oder zu verschiedenen Zwecken in drei nebeneinander liegenden gemauerten Kanälen dar. Im mittleren Kanal sind die Speisekabel gedacht, in den beiden äusseren die Strassenbeleuchtungs- und Niederspannungs-Verteilungskabel. Abzweigungen werden nur an den Kabeln in den äusseren Kanälen ausgeführt.

Fig. 95 zeigt die Verlegung von einem Hochspannungs- und zweier Niederspannungskabel mit Backsteinabdeckung, wobei verschiedene Höhenlage der Kabel gewählt wurde.[1])



Fig. 95.

Einen besseren gegenseitigen Schutz hat man nun darin gefunden, die Kabel in Kanäle zu verlegen, die mit Erdwachs ausgegossen werden oder sie in Rohre einzuziehen. Dazu hat man vorteilhaft Systeme aus Steingut verwendet, nicht allein weil diese billig sind, sondern auch, weil man durch Verwendung derselben chemische Einwirkungen auf das Blei vermeidet. Auf leichte Ein- und Ausziehbarkeit des Kabels muss man natürlich hierbei verzichten, sodass für Verteilungsleitungen die Verwendbarkeit ausgegossener Röhren ausgeschlossen ist, doch kann man in solchen Fällen Kanäle anwenden.

Vielfach werden Röhren, die aber dann nicht ausgegossen werden, in Gruppen verlegt, so dass bei Veränderungen an der Leitung die Strassenoberfläche nicht gestört, sondern die Kabel durch zwischengemauerte Einstiege in die Kanäle eingezogen werden. Die Reichspost hat in Berlin und Charlottenburg diese Art der Kabelverlegung durchgängig eingeführt und in Abständen von ca. 50 m je einen Einstieg (Mannloch) zu der Röhrengruppe hergestellt und diesen auf der Strassenoberfläche durch eine Granitfliese mit eingelassenem Ring abgeschlossen (vgl. S. 100 u. ff.).

In vielen Fällen, hauptsächlich in der Nähe der Zentrale, werden es die örtlichen Verhältnisse nicht immer zulassen, die Kabel in grösseren Abständen von einander zu verlegen, ja es ist oft nicht angängig, die erwünschten Abstände zwischen Kabeln verschiedener Betriebsspannung einzuhalten, da vielfach eine zu grosse Zahl von Speisekabeln in Betracht kommt. Man beschränkt sich daher in solchen Fällen auf die Verlegung entsprechend geschützter Reservekabel, um diese im Falle einer Betriebsstörung sofort als Ersatz verwenden zu können. Zu diesem Zwecke baut man an den Punkten, bis zu denen sie mit den Hauptspeisekabeln parallel verlaufen, Kabelkästen ein und führt die Kabel sämtlich hindurch. Diese Kabelkästen brauchen ein besonderes Verteilungsgestänge nicht zu besitzen, werden aber untereinander verbunden und nehmen die Reservekabel in der Weise auf, dass sie entweder nur nach einem, oder nach mehreren Kästen geführt werden. Die Reservekabel, die einen wesentlich geringeren Querschnitt als die Kabel, welche sie im Notfall ersetzen sollen, zu haben brauchen, bleiben unter normalen Verhältnissen stromlos, müssen aber stets mit bequemen und sicheren Einschaltevorrichtungen versehen sein, in der Zentrale sowohl als in den Zwischenkästen, damit dieselben im Bedarfsfalle sofort in Betrieb gestellt werden können.

Die Verlegung der Kabel in Gräben.

Bezüglich der eigentlichen Kabelverlegung kommen zwei Arten in Betracht; die Kabel werden direkt ins Erdreich gebettet, entweder ohne oder

1) Entnommen aus „Die Versorgung der Städte mit Elektrizität“ von O. v. MILLER, Stuttgart.

nur mit geringem Schutz gegen mechanische Angriffe, oder sie werden in besondere Rohrsysteme, Kanäle und dergl. eingezogen. Die Verlegung der Kabel im Inneren der Centralen wird besonders behandelt werden müssen.[1])

55. Der Kabelgraben. Der Kabelgraben wird so tief ausgehoben,[2]) dass die Kabel dauernd frostfrei liegen. Als normale Tiefe kann man etwa 60—75 cm annehmen. Sollten Guttaperchakabel in Frage kommen, so wählt man besser eine Verlegungstiefe von 1 m, um das Kabel gegen den Einfluss der Sonnenwärme zu schützen.

Die Breite des Grabens beträgt mindestens 35 cm, wenn 2—3 Kabel verlegt werden sollen. Für eine grössere Anzahl muss er entsprechend breiter hergestellt werden.

Nach dem Ausheben des Erdreichs wird die Sohle des Grabens geebnet, von Steinen, Holz und allen Substanzen gesäubert, die, in Fäulnis übergehend, die Kabelhülle chemisch beeinflussen könnten. In besonders unreinem Erdreich wird dies nicht ohne weiteres möglich sein und man zieht es dann vor, in den Graben zunächst eine Schicht reinen Sandes zu schütten, die 10—15 cm hoch sein muss.

Die Nähe von Bäumen bietet für die Anlegung eines Kabelgrabens stets Schwierigkeiten und es ist vorteilhaft, sie zu meiden. Man wähle die Kabelstrecke aus diesem Grunde ausserhalb der Ortschaften möglichst in der Mitte der Strasse. Im Inneren der Städte kommen andere Gesichtspunkte zur Geltung, hier muss auf den Verkehr und die mannigfachen Rohrleitungen u. s. w. besonders Rücksicht genommen werden. Man verlegt daher in diesem Fall die Starkstromkabel meistens am Rande der Bürgersteige. Wie wichtig eine Einigung der einzelnen Instanzen bezüglich des einzuschlagenden Weges ist, zeigt Fig. 96, der von KALLMANN[3]) gezeichnete Querschnitt einer Berliner Strasse, aus welchem ersichtlich, dass die 4 m breiten Bürgersteige zur Verlegung aller nur denkbaren Leitungen herangezogen werden.

Erscheinen im Graben Hindernisse, so ist es notwendig, das Kabel unter dieselben zu verlegen, also den Graben so tief zu legen, dass auch die zum Schutze des Kabels etwa erforderlichen Abdeckmittel noch unter das Hindernis zu liegen kommen, und zwar geschieht dies, weil an einem Kabel viel seltener gearbeitet wird, als an einer Rohrleitung. Müsste der Graben jedoch infolge hindernder Gas- oder Wasserrohre, gemauerter Abwässerkanäle, Cementrohre u. s. w. tiefer als 2 m aufgeworfen werden, so wird man ausnahmsweise das Kabel über dem Hindernis verlegen.

An Strassenkreuzungen ist auf die Aufrechterhaltung des Verkehrs Rücksicht zu nehmen. Die Übergänge sind deshalb so lange wie möglich unberührt zu lassen und werden erst unmittelbar vor Anrücken der mit der Legung betrauten Arbeiter ausgehoben und der Graben dann durch Notbrücken überbrückt. Bei Unterführung von Geleisen verlegt man das Kabel mindestens 1 m tief und zieht es in eiserne Rohre ein. Alle Geleise müssen möglichst rechtwinklig gekreuzt werden.

56. Das Verlegen. Eine richtige Verteilung der vorhandenen Arbeitskräfte längs der ganzen Kabelstrecke ist in erster Linie erforderlich und zwar wird man die sachkundigen Handwerker an das Kabel selbst stellen, während man eine Arbeiter-

1) Vgl. Hdb. VI, 2: Verlegung der Leitungen in Centralen.

2) Es ist versucht worden, lange Kabelgräben mit Hilfe eines Pfluges aufzuwerfen; vgl. Technische Rundschau 1902, S. 286.

3) ETZ 1895, S. 211.

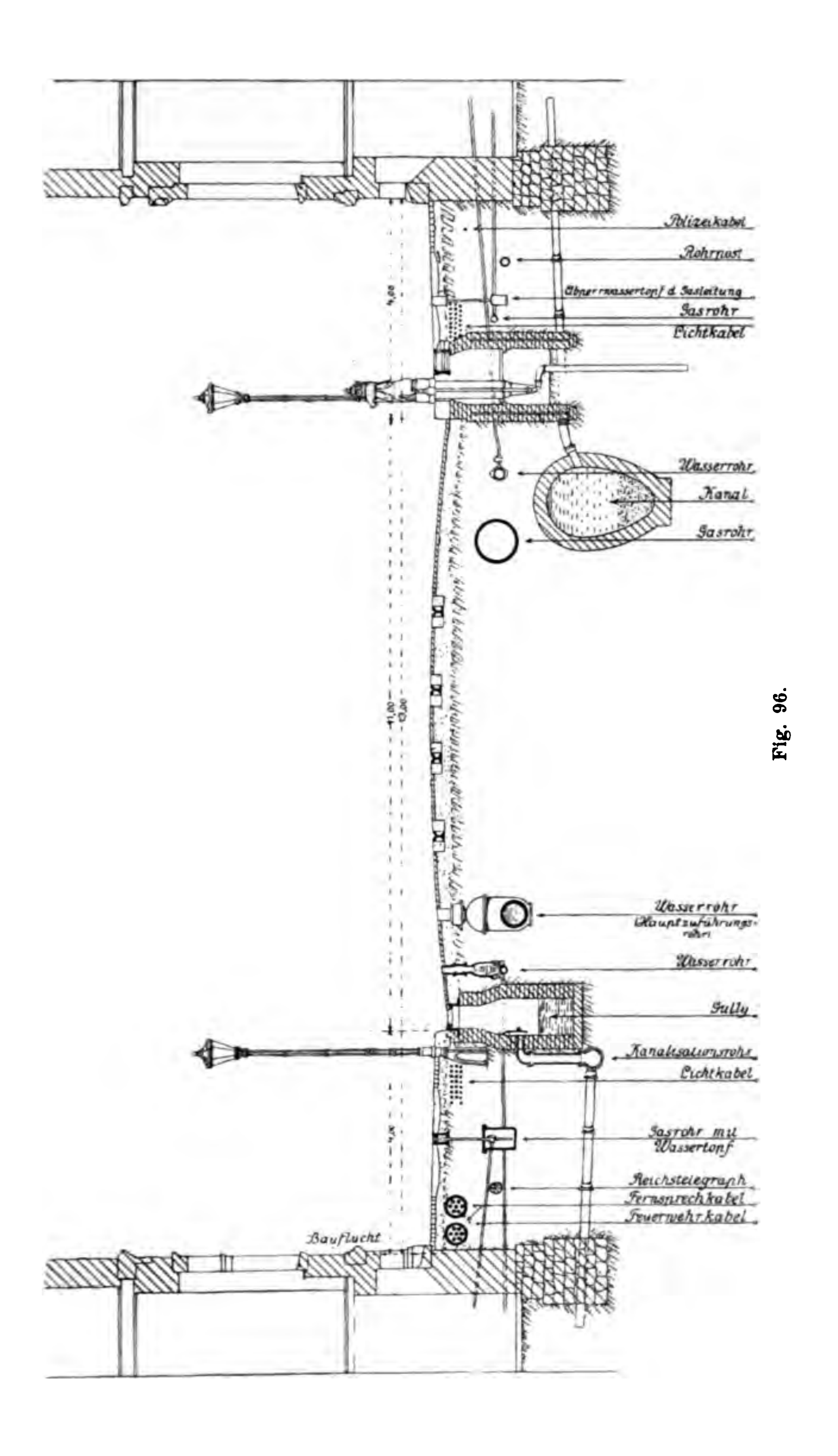

Polizeikabel
Rohrpost
Absperrwassertopf d. Gasleitung
Gasrohr
Lichtkabel
Wasserrohr
Kanal
Gasrohr
Wasserrohr
(Hauptzuführungsrohr)
Wasserrohr
Gully
Kanalisationsrohr
Lichtkabel
Gasrohr mit Wassertopf
Reichstelegraph
Fernsprechkabel
Feuerwehrkabel
Bauflucht

Fig. 96.

gruppe zum Grabenausheben, eine andere zur Kabellegung, eine weitere zum Zuwerfen des Grabens und die letzte zum Wiederherstellen der Strassenoberfläche verwendet. Unbedingt erforderlich ist es natürlich, wesentliche Biegungen des Kabels zu vermeiden und auch beim Verlegen desselben unter ein Hindernis hindurch sanftes Gefälle und Steigung des Erdbodens herzustellen, da sich sonst das Kabel durchbiegen würde oder äusserem Druck und Zerrungen ausgesetzt wäre. Einem Kabel scharfe Biegungen oder Knicke, z. B. bei den Verlegungsarbeiten, zuzumuten, ist ganz besonders schädlich für dasselbe und man wird das Verlegungspersonal eingehend instruieren müssen, um Schaden zu vermeiden.

In günstigen Fällen, wenn keine Hindernisse im Wege stehen, kann das Kabel vom Kabelwagen direkt in den Graben eingelegt werden.[1]) In anderen Fällen wird man das Kabel erst neben den Graben legen müssen, um es erst nach dem Auslegen auf die Sohle des Grabens zu bringen.

Beim Ziehen des Kabels verteile man die Arbeiter je nach Schwere des Kabels in Abständen von 5—10 m (vgl. Fig. 90). In Kurven und bei Hindernissen, wie Laternen, Bäumen u. s. w. müssen die Leute in geringeren Abständen aufgestellt werden.

Bei Verwendung ungeübten Personals hat man besonders vorsichtig zu sein. Die Arbeiter nehmen das Kabel gern auf die Schulter oder stehen in zu grossen Abständen, so dass es an diesen Stellen zu stark gebogen wird.

Um die Arbeit zu erleichtern, verteilt man im Kabelgraben in Entfernungen von 3—5 m Kabelrollen, wodurch einige Arbeitskräfte erspart und die Kabel bedeutend geschont werden. Derartige Gleitrollen werden aus Eichenholz hergestellt, sind an den Stirnseiten mit Eisen armiert und haben eine stabile, gewöhnlich mit Eisen armierte Grundplatte, sowie eine kräftige schmiedeeiserne Achse.

Ein Zugstrick, welcher um das Kabel geschlungen und in handlicher Höhe mit einem Querholz versehen ist, welches je einem oder zwei der ziehenden Arbeiter als Handhabe dient, ist ebenfalls ein gutes Hilfsmittel und sollte stets angewendet werden.

Ist das Kabel eingelegt, so beginnt das Ausrichten desselben (vgl. Fig. 97 und 100), und zwar, wenn mehrere Kabel zusammenliegen, bei jedem einzelnen besonders. Ist Platz genug vorhanden, so werden die Kabel in einem gewissen Abstand voneinander verlegt, um Muffen ohne Richtungsänderung des Kabels einbauen zu können (Fig. 100). Bei grösserer Anzahl der Kabel ist dies nicht möglich, die Muffen müssen dann umgangen werden (Fig. 97).

Sehr wichtig ist es, die Kabel so zu kennzeichnen, dass man sie später erkennen kann, ohne sie besonders zu prüfen. Es geschieht dies durch Umlegen von Bleistreifen um das Kabel, in welche die erforderlichen Daten eingeschlagen sind. Die letzterwähnte Figur lässt diese Anordnung deutlich erkennen. Vor dem eigentlichen Zudecken durch Maurer- oder andere Schutzarbeiten hat der Bauleiter sich noch einmal persönlich von der sachgemässen Ausführung der Arbeit zu überzeugen, worauf der eine Teil der Arbeiter den Graben zuschüttet und feststampft, während der andere die Strassenoberfläche wiederherstellt.[2])

---

1) Um das Verlegen zu beschleunigen, ist versucht worden, einen Dampfwagen zu Hilfe zu nehmen. The Electrician, London 1904, S. 987.

2) Vgl. auch ETZ 1891, S. 86.



Fig. 97.

Wie bereits erwähnt, dürfen Kabel im gefrorenen Zustand nicht verlegt werden. Hierdurch treten aber mitunter unliebsame Verzögerungen auf.

Die Land- und Seekabelwerke Köln haben daher ein Verfahren zur Verhütung des Brüchigwerdens elektrischer Kabel bei der Verlegung in kalter

Witterung patentieren lassen,[1]) welches darin besteht, dass das Kabel erwärmt wird, indem heisse Luft, Gase oder Dämpfe, welche beispielsweise mittels transportablen Ofens erzeugt werden, in den von der Trommel gebildeten Hohlraum unmittelbar vor bezw. bei der Verlegung eingeleitet werden. Befindet sich das Kabel nicht auf der Trommel, sondern ist es in Ringen gewickelt, so kann man zwecks Bildung des Hohlraumes eine Anzahl dieser Ringe aufeinanderreihen und den so geschaffenen Hohlzylinder aussen mit einem Stoffe, wie z. B. Leinwand, umkleiden, um ein Entweichen der Wärme nach aussen hin möglichst einzuschränken.

Nach einem englischen Patent wird das Kabel zum gleichen Zweck durch ein geheiztes luftdicht abgeschlossenes Gehäuse hindurchgeführt.[2])

Ausser dem schützenden Erdreich ist bei manchen Kabelstrecken noch ein weiterer Schutz erforderlich. Dieser ist meistens infolge der Bodenbeschaffenheit, schädlich einwirkender Gase, Säuren u. s. w., oder auch an solchen Stellen geboten, an denen das Kabel durch häufige Strassenarbeiten gefährdet werden kann, welch letzterer Fall meistens in Städten eintritt.

Das Kabel muss in solchen Fällen entweder nach allen Seiten oder nur nach der am meisten gefährdeten Seite geschützt werden, zu welchem Zwecke verschiedene Hilfsmittel konstruiert wurden.

Die Verlegung in besondere Kanäle und die Schutzmittel gegen mechanische Verletzungen von Kabeln.

57. Allgemeines.

Die Anzahl der angegebenen Schutzmittel ist ungemein zahlreich, sie bieten zum Teil dem Kabel einen thatsächlichen Schutz, zum Teil sind sie nur vorhanden, um bei Erdarbeiten den Arbeiter darauf aufmerksam zu machen, dass Kabel unter der Abdeckung liegen, um ihn somit zum vorsichtigen Weitergraben zu veranlassen. — Bedingung für jede Abdeckung ist, dass sie das Kabel an jeder Stelle schützt und nicht Stellen freilässt, an denen Pickenhiebe ohne weiteres das Kabel treffen können, ferner muss sie so beschaffen sein, dass Kreuzungen und Abzweigungen leicht an jeder Stelle vorgenommen werden können. Dass die Abdeckungsart für die verschiedenen Kabel richtig gewählt werden muss, ist selbstverständlich. Werden eisenarmierte Kabel verlegt, so genügt eine Abdeckung mit Ziegelsteinen, während für unarmierte Kabel sicherere Hilfsmittel vorhanden sein müssen.

58. Anforderungen, die an einen Kabelkanal gestellt werden.

Im übrigen erfolgt die Abdeckung mit Formstücken aus Thon, Cement, Beton oder Eisen, oder die Kabel werden in Rohre aus den gleichen Materialien eingezogen.[3])

Die Bedingungen, denen ein guter Kabelkanal genügen muss, hat Rühl wie folgt zusammengestellt:[4])

a) Das Material zu den Werkstücken und zu ihrer etwa erforderlichen Umhüllung muss dauerhaft und möglichst widerstandsfähig gegen mechanische und chemische Einflüsse sein.

---

1) Patent-Anmeldung A 5079,02.

2) EP 22378 (1900). Im übrigen haben die Berliner Elektrizitätswerke bei grosser Kälte ihre Kabel schon vor Jahren vor der Verlegung geheizt.

3) Eine ausführliche verdienstvolle Arbeit über den Kabelschutz hat Schmidt veröffentlicht, ETZ 1903, S. 55, 75, 117, 131, 160, 185, die auch in den folgenden Ausführungen berücksichtigt wird.

4) Archiv für Post und Telegraphie, 1903.

b) Die einzelnen Werkstücke sollen möglichst handlich sein, bei der Verlegung eine gewisse Bewegungsfreiheit im Querschnitt des Raumes und in der Richtungslinie gestatten und nach der Verlegung einen sicheren Zusammenhang untereinander gewährleisten, so dass sich der Kanal bei Untergrabungen oder Unterspülungen auf eine mässige Länge freiträgt.

c) Der Aufbau der Kanäle soll rasch von statten gehen.

d) Die Kabelzüge sollen im Innern so glatt sein, dass die blanken Bleikabel ohne Schwierigkeiten auf grössere Längen eingezogen werden können.

Als letzte Bedingung wäre noch hinzuzufügen:

e) Die Einzelstücke der Kabelkanäle sollen überall leicht herzustellen und möglichst preiswert sein.

59. Wahl des Materials.

Cement scheint vermöge seiner Porösität nicht so geeignet zu sein wie Thon, doch wird derselbe in neuerer Zeit dem Thon vorgezogen und fast ausschliesslich bei der Fabrikation von Kabelschutzhüllen verwendet. Cement sollte nur für armierte Kabel, für blanke Bleikabel eigentlich gar nicht in Anwendung kommen, denn er saugt fortwährend Feuchtigkeit an; diese Feuchtigkeit nimmt aus dem Cement Ätzkalk auf, welcher, nach den Innenwänden der Kanäle ausgeschwitzt, die eingelagerten Kabel chemisch angreift und mit der Zeit zersetzt. Ist die aufgenommene Feuchtigkeit nun noch mit den Salzen und Säuren der Bodenstoffe geschwängert, so wird der Zersetzungsprozess natürlich ein noch stärkerer sein. Cementrohre werden daher im Inneren mit heissem Asphalt gestrichen.

Bei Thonkabelschutzhüllen, welche man fast ausschliesslich in Amerika, England, Belgien und auch in Deutschland vielfach verwendet hat, haben sich Nachteile der vorerwähnten Art nicht herausgestellt, da Thon, klinkerhart gebrannt, nichts enthält, was Kabel chemisch schädigen könnte.

Ausserdem ist Thon in der Praxis billiger.

Ein kürzlich aufgestellter Versuch über die Standhaftigkeit verschiedener Rohrkanäle bei Kurzschluss oder Durchschlag in Bezug auf die Gefährdung benachbarter Kabel hat folgendes Resultat geliefert: Drei verschiedene Sorten, und zwar Cementrohr mit Eisenblechüberzug, gebranntes Thonrohr und Betonrohr wurden in entsprechender Länge normal einbetoniert und Kabelstücke eingeführt, zwischen deren Leiter Nägel zwecks Bildung eines starken Kurzschlusses eingetrieben waren. Beim Schliessen des Stromes wurden bei verschiedenen Proben 2000 bis 3000 Amp. bei 125 Volt beobachtet.

In der Praxis dürften wohl schwerlich derartige Bedingungen gestellt werden und man kann daher die Resultate als massgebend erachten:

Cementrohr mit Eisenblech ist dabei gesprungen und durchgebrannt,
gebranntes Thonrohr gesprungen und teilweise geschmolzen,
Betonrohr zeigte geringe Risse und ist nicht gebrochen.

Für schwere Betriebsbedingungen dürfte daher wohl das Betonrohr das sicherste sein, weil es allen anderen bei weitem überlegen ist.

60. Schutz durch Abdeckung mit Ziegelsteinen.

Die einfachste Form des Kabelschutzes ist die Abdeckung mit gewöhnlichen Ziegelsteinen. Das Kabel wird mit einer Sandschicht von 10 bis 15 cm bedeckt und dann werden Ziegelsteine derart aufgelegt, dass die einzelnen Steine möglichst nahe aneinander liegen, damit Pickenhiebe stets den Stein treffen und nicht durch die Fugen dringen.

Diese Art der Abdeckung ist aus Fig. 98 erkenntlich. Ist nur ein Kabel zu schützen, so wird es ausreichen, die Ziegelsteine in ihrer Längsrichtung zu verlegen, bei mehreren Kabeln wird der Stein quer oder, wenn einer nicht mehr ausreicht, so viele nebeneinander gelegt, dass die Abdeckung die Kabel immer nach beiden Seiten überragt.

Nicht immer kann dieser Schutz als genügend angesehen werden, z. B. dann nicht, wenn Verletzungen von der Seite her zu erwarten sind. Vielfach werden dann die Schutzsteine in der in Fig. 99 wiedergegebenen Form angeordnet. Hierdurch wird aber auch die dreifache Anzahl von Steinen erforderlich. Einfacher ist es, besonders zur Abdeckung hergestellte Steine zu verwenden, die dann sicherer sind, weil die seitlichen Fugen ganz wegfallen. So zeigt Fig. 100 die Abdeckung von Kabeln mit halbrunden Ziegeln. Auch die in Fig. 103 gezeigten Normalkabelsteine können halbiert entsprechende Verwendung finden.

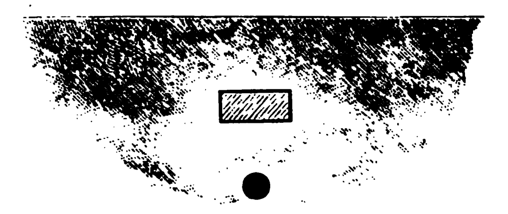


Fig. 98.

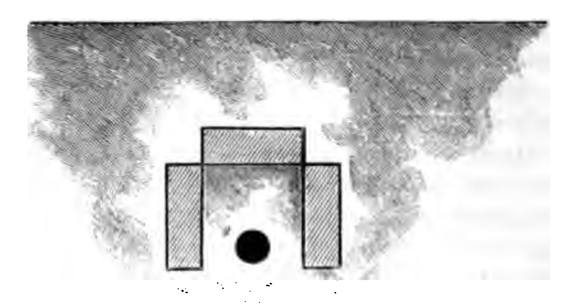


Fig. 99.

In Kurven genügt eine einfache Abdeckung nicht, da an ihrem äusseren Rande Fugen entstehen; an diesen Stellen werden dann zwei Ziegelschichten übereinander gelegt, und zwar so, dass die obere Reihe die Fugen der unteren überdeckt.

Keilförmige Steine zu verwenden oder gewöhnliche Steine keilförmig zuzuhauen wird unnötig teuer.

61. Schutz durch gemauerte Kanäle.

Von der Abdeckung mit einzelnen Ziegelsteinen zum gemauerten Kanal ist nur ein kleiner Schritt, da naturgemäss das Bestreben besteht, die Ziegelsteine gegen eine Lagenveränderung zu schützen (siehe Fig. 101).

Der Kabelkanal wird in der Regel so hergestellt, dass mehrere Steine ausgelegt, mit Mörtel verbunden und dann einige Steine als seitliche Wände aufgeführt werden. Die Kabel werden eingelegt, der Kanal mit Sand gefüllt und oben noch mit Ziegelsteinen abgedeckt.

An den Stellen, wo Abzweigungen vorgenommen werden sollen, wird ein gemauerter Schacht angelegt.

Es sind vielfach Kanäle hergestellt worden, die, nachdem das Kabel ingelegt war, mit Bitumen vergossen wurden. Freilich hat dieses System len Nachteil, dass die Kabel nur schwer wieder ausgewechselt werden

62. Verlegung in Kanäle, die ausgegossen werden. Ausgussmasse.



Fig. 100.

önnen. Man hat daher vielfach auf das Ausgiessen ganz verzichtet, inlessen dann Explosionen zu verzeichnen gehabt, die auf das Eindringen von Leuchtgas zurückzuführen waren, welches sich in den langen Kanälen in genügender Menge ansammeln konnte. Zum mindesten sind die Kanäle daher

zu unterteilen. Jedenfalls ist diese Art der Montage als sicher genug angesehen worden,[1] um bei ihrer Anwendung auf den Eisenpanzer des Kabels selbst ganz zu verzichten und nur blanke, höchstens asphaltierte Bleikabel zu verwenden.[2] Andererseits wird aber behauptet,[3] dass auch durch die Ausgussmasse Explosionen herbeigeführt werden können, da sich beim Durchschlagen eines Kabels im Bitumen Dämpfe entwickeln, die in den Einsteigschächten unter Umständen explodieren.

Diese Kanäle nun bestehen aus Gusseisen,[4] Eisenblech, Holz, Thon u. dergl.

Gusseisenrohre haben sich schlecht bewährt, da sie in verseuchtem Boden rasch zerstört werden; in feuchtem Boden können sich durch die Berührung zwischen dem Blei des Kabels und dem Eisen des Kanals chemische Einflüsse störend geltend machen. Um sie auszuschliessen, wird das Kabel nicht unmittelbar in den Kanal, sondern auf irgend welche schmalen Querträger gelegt, sodass die Eingussmasse das Kabel von allen Seiten umgeben kann. So sind in Köln Holzkästen verwendet, in denen eiserne Querbänder

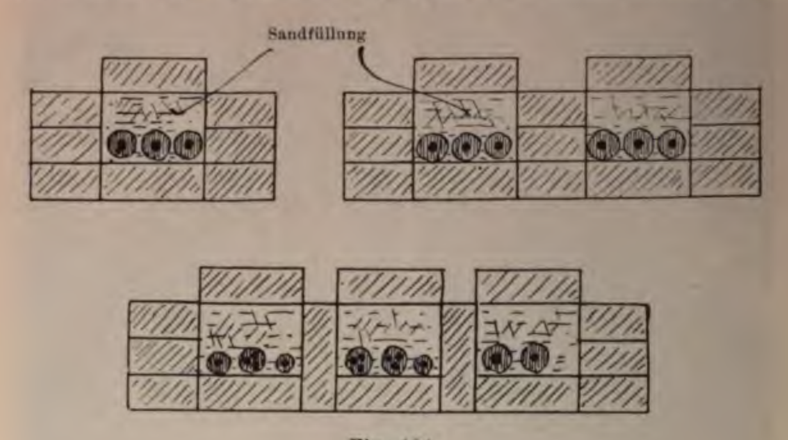


Fig. 101.

als Stützen dienen; in Liverpol liegen schon seit längerer Zeit Kabel in eisernen Kästen auf hölzernen Stützen. Diese Kanäle sind mit vulkanisiertem Erdwachs ausgegossen.[5]

In Amerika wurde längere Zeit das Dorsett-System angewendet. Es besteht aus Blöcken mit Öffnungen. Als Material wurde ein Gemisch von Teer, Asphalt und Sand verwendet. Die einzelnen Stücke werden erwärmt und durch eine leichtflüssige Masse miteinander verbunden. Sie erwärmten sich indessen so, dass die Kabel festklebten.

Nach Howard werden die Kabel in dünnwandige Eisenkästen eingelegt (Fig. 102a), die innen mit Asphalt ausgekleidet sind. Nach der Verlegung werden die Kabel mit flüssigem Bitumen übergossen, so dass sie davon überdeckt sind. Das Eisen rostet bald ab, jedoch bleibt der Asphalt als natürliche

1) Die Ansichten über den Wert dieses Systems gehen sehr auseinander. Während die auf S. 104 gegebene Zusammenstellung eine Zunahme seiner Verwendung in England angiebt, wird in der deutschen Literatur wenig günstig geurteilt (vgl. E T Z 1903, S. 185).

2) Vgl. auch S. 104, Anwendung dieses Systems in England.

3) Dr. Baur, Das elektrische Kabel, S. 213.

4) Über die Verlegung in Eisenrohre vgl. S. 102.

5) Vgl. auch Electrician 1904, S. 707.

Schutzhülle bestehen. Die Muffen und Biegungen sind so eingerichtet, dass sie durch Erwärmung beliebig gebogen werden können.

Kanäle aus geteertem Holz werden vorteilhaft verwendet, da diese sich durch ihre Billigkeit anderen Materialien gegenüber auszeichnen und sich vor allem ohne Fugen aneinander verlegen lassen. Mit Ziegelsteinen abgedeckt, geben diese Kanäle beinahe einen ebenso grossen Schutz gegen mechanische Einflüsse, wie die gusseisernen Kanäle.

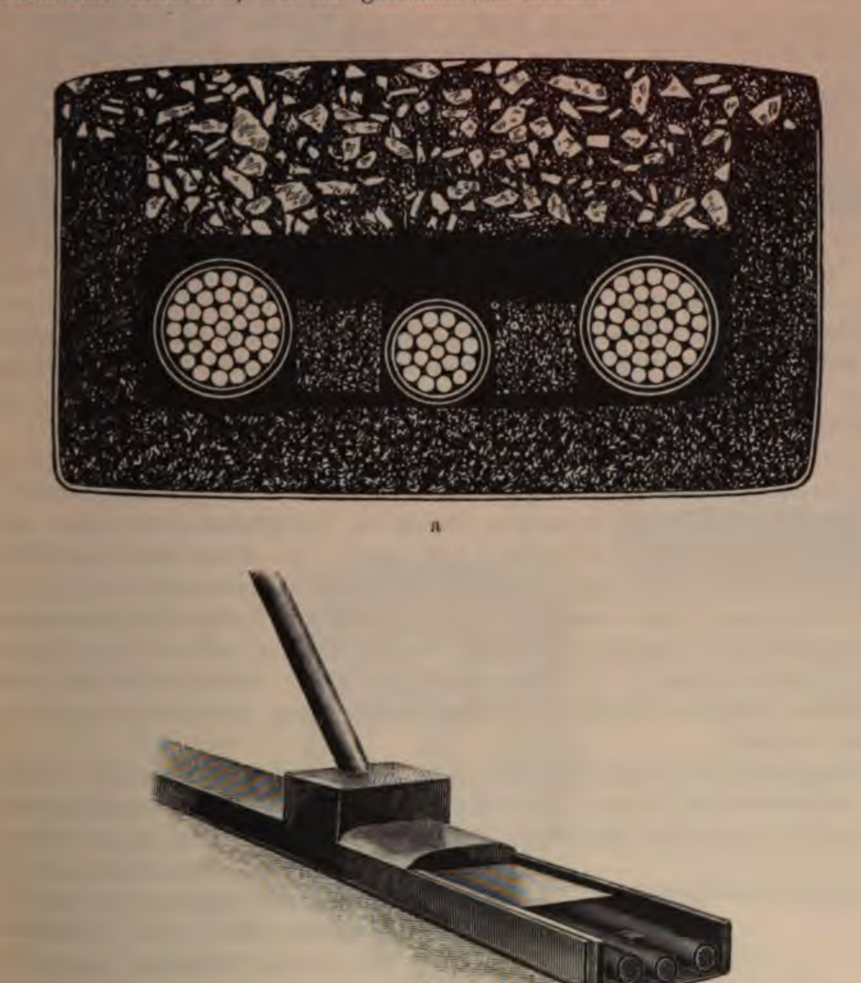


Fig. 102.

Ein Übelstand bleibt bei den aus Steingut verwendeten Kanälen noch zu erwähnen, welcher darin besteht, dass diese naturgemäss nur in kurzen Längen herzustellen und verwendbar sind. Hierdurch entsteht eine grosse Zahl von Stossfugen, die sich nicht gut abdichten lassen, so dass infolgedessen die Gefahr einer Unterbrechung der Kontinuität der Füllmasse naheliegt.

Zum Ausgiessen von Kabelkanälen mit Bitumen muss dasselbe auf etwa 230° C. erhitzt, abgefüllt und auf ca. 175° abgekühlt werden, um dann erst Verwendung zu finden. Das Kabel muss vollständig trocken sein, da

die Masse am feuchten Metall nicht haftet und so ein freier Raum zwischen Kabel und Isolierung entstehen würde.

In den Vereinigten Staaten ist das EDISONsche System viel gebräuchlich, nach welchem die Verlegung blanker Kupferleiter in Stahlrohren geschieht, die dann mit Bitumen ausgegossen werden.

Fig. 102 zeigt ein in England übliches Verfahren der Kabeleinbettung in Asphalt (HOWARD Solid System). In der in Fig. *a* wiedergegebenen Art ruhen die Kabel in einem Kasten dünnen Bleches, der ausgekleidet ist; die eingelegten Kabel wurden vergossen und in der gezeichneten Art abgedeckt. Die Herstellung der Abdeckung erfolgt durch das Auftragen von Gussasphalt, der durch besondere Werkzeuge (Fig. *b*) fest gepresst wird.

63. Verlegen in Thonröhren.

Eine weitgehende Verwendung bei der Kabelverlegung haben die gewöhnlichen glasierten Thonröhren gefunden. Dieselben ermöglichen ein leichtes Ein- und Ausziehen der Kabel und werden hauptsächlich da verwendet, wo ein späteres Aufbrechen des Strassenkörpers vermieden werden soll. Bei ihrer Wahl muss man jedoch sehr vorsichtig sein, denn der Schutz ist nicht so gross; ein einziger Pickelhieb kann die bezweckten Vorteile illusorisch machen. Das Einziehen des Kabels ist natürlich das bei weitem leichteste Verfahren von allen ähnlichen Systemen, da die glasierte Wandung keinen Widerstand entgegensetzt, doch hat man bei Verlegung mehrerer Kabel in einer Röhre grössere Schwierigkeit.

Um das bei diesen Rohren erwähnte Hauptübel, die Unmöglichkeit der Auswechselung eines gebrochenen Rohrstückes zu beseitigen und ferner die Revision des Kabels an beliebigen Stellen zu ermöglichen, sind auch zweiteilige Thonröhren zur Verwendung gekommen, bei denen die obere Hälfte in die untere mit einem Falz eingreift und leicht abgenommen werden kann.

Im übrigen können halbe Thonrohre auch zur Kabelabdeckung anstatt der gewöhnlichen Ziegelsteine dienen, etwa in der Art, wie es Fig. 100 zeigt.

Im allgemeinen ist der Raumersparnis wegen darauf zu achten, dass die Muffen mehrerer Röhren nicht aneinander liegen, sondern gegeneinander versetzt werden.

64. Verlegen in Formsteine aus Thon.

Sogenannte Normalkabelsteine, von quadratischem Querschnitt, werden von der Deutschen Normal-Kabelstein-Industrie, Hildesheim, aus klinkerhart gebrannter Thonmasse hergestellt (Fig. 103). Dieselben sind gegen Erdsalze und Säuren sehr widerstandsfähig und bieten ebenso Schutz gegen chemische Angriffe der Bodenstoffe. Diese Kabelsteine werden erst bei der Verlegung durch einen Hammerschlag in der Länge gespalten und haben anderen Systemen gegenüber den Vorzug, dass sie sich beim Brennen, Formen und Trocknen nicht verziehen und dass die durch die Bruchflächen entstandenen Falze genau aufeinander passen; ein späteres Verschieben der Teile gegeneinander ist so gut wie ausgeschlossen. Die Verlegung dieser Kanäle ist äusserst handlich, so dass dieselben nicht allein in der Erde, sondern auch bequem in Wände verlegt werden können, weil die Dimensionen

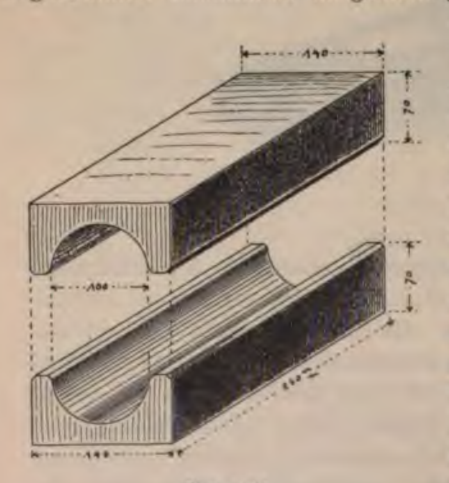


Fig. 103.

der einzelnen Steine 25 × 14 × 14 cm, mit der Länge und Breite, sowie der doppelten Stärke unserer gewöhnlichen Mauersteine übereinstimmen, daher der Name Normalkabelsteine. Die lichte Weite ist 10 cm, so dass also die geringste Wandstärke 2 cm beträgt. Die Spaltung des Steines erfolgt in der Mitte und ist hierauf bei der Fabrikation Rücksicht genommen.

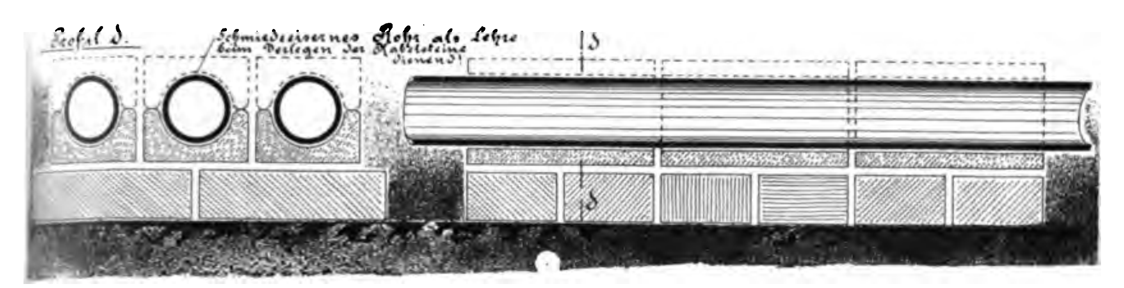


Fig. 104.

Bei der Verlegung bezw. dem Vermauern dieser Kabelsteine kommt es darauf an, dass die Innenflächen der einzelnen Kanäle genau fluchtrecht und gerade verlegt werden.

Das Ausrichten dieser wie auch der später beschriebenen ähnlichen Konstruktionen erfolgt auf die nachstehend beschriebene Weise:

Nachdem die Baugrube ausgehoben und die Sohle planiert ist, werden die Steine an den Seiten des Grabens verteilt, gespalten und die untere Hälfte in Sand oder Cementmörtel auf die Sohle gebettet. Zum Ausrichten der so verlegten unteren Hälften der Steine bedient man sich einer runden, der Lochung des Steines gegenüber um einige Millimeter schwächeren Leere von mindestens 4 bis 5 m Länge in Form eines schmiedeeisernen Rohres (Fig. 104). Dieses wird in die durch Aneinanderlegen der vorerwähnten Hälften gebildete Rinne als Richtscheit gelegt und nach dem Verlegen jeden Steines vorgeschoben.

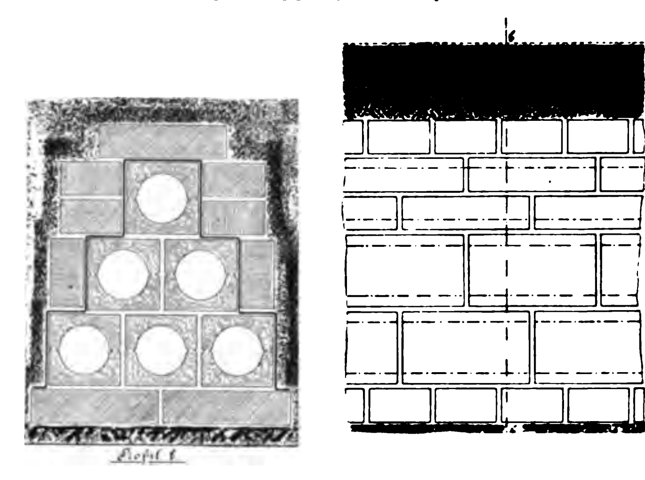


Fig. 105.

Entweder wird das Kabel jetzt eingelegt und der Kabelkanal durch Auflegen der zweiten Steinhälfte geschlossen, oder der Kanal wird erst fertiggestellt und das Kabel nachträglich eingezogen. — Jedenfalls werden nach dem Auflegen der oberen Hälften die äusseren Fugen mit Mörtel ausgeworfen und eventuell das ganze Kanalsystem mit Ziegelsteinen ummauert (Fig. 105); zur grösseren Sicherheit kann auch die in Fig. 106 wiedergegebene Anordnung gewählt werden. Sollen die Kanäle unmittelbar unter den Fusssteigen liegen, so werden die Steine flach verlegt (Fig. 107).

Handelt es sich nur um den Schutz einzelner armierter Kabel, so werden die Steine nicht besonders verputzt.

Um Abzweigungen u. s. w. herzustellen, werden besondere Schächte gemauert, in welche die verschiedenen Rohrstrecken einmünden (Fig. 108).

Die von J. Hevendehl, Düsseldorf, konstruierten Kabelsteine, genannt „Reformkabelsteine“, verdienen noch besonderer Erwähnung. Es sind dies ebenfalls klinkerhart gebrannte Thonsteine (Fig. 109). Ein guter Verschluss

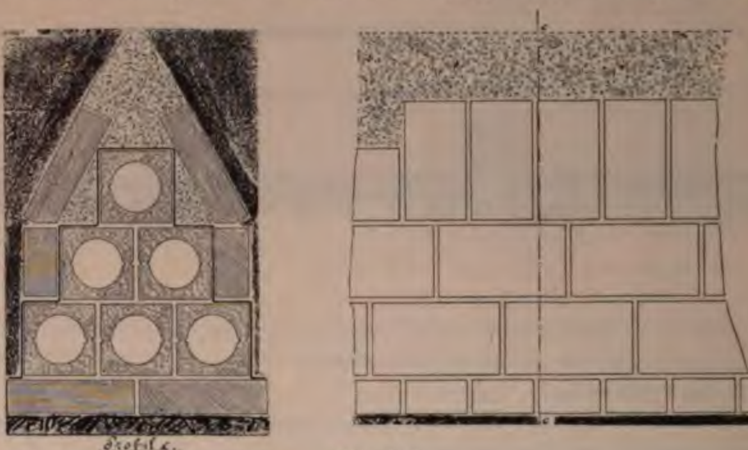


Fig. 106.



Fig. 107.



Fig. 108.

der Kanäle ist dadurch erreicht, dass der Deckel keilförmig in die Wandungen eingreift. Die Kanäle haben quadratischen Querschnitt und sind stets nur zur Aufnahme eines einzelnen Kabels eingerichtet; verschiedene Kombinationen lassen sich durch Aneinanderfügen der einzelnen Formstücke leicht herstellen. Die Fig. 109 zeigt die Anordnung.

Ein anderes billiges und praktisches System von Abdeckungen hat sich schon bei einer Anzahl grösserer Elektrizitätswerke eingebürgert und ist in den Fig. 110 u. 111 dargestellt.

Diese Kanäle sind Konstruktionen der Vereinigten Ziegelfabriken Thaingen und Hofen, Zündel & Co., Kanton Schaffhausen.

Sie erhalten gefalzte (Fig. 110 b) oder ungefalzte Deckel (Fig. 110 a); jedoch sind die ersteren vorzuziehen, wenngleich sie auch teuerer sind, denn eine unbeabsichtigte Verschiebung des ungefalzten Deckels kann den Vorteil des

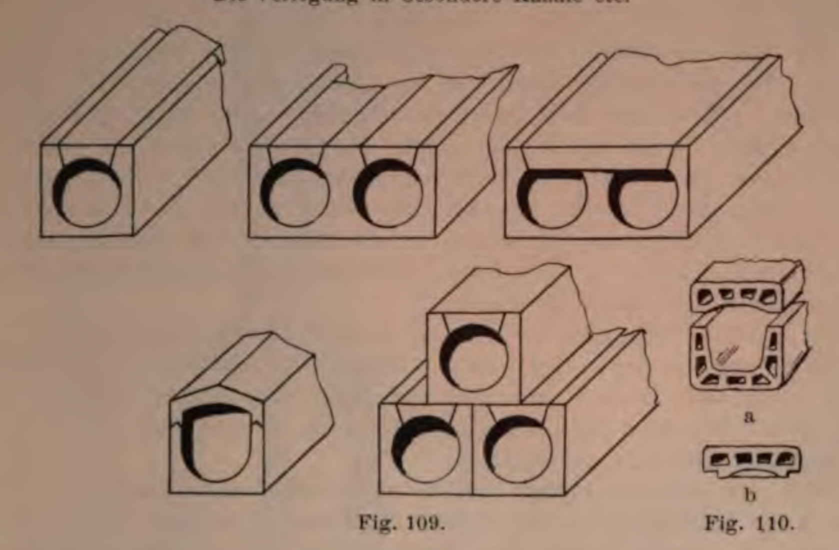


Fig. 109. Fig. 110.

Kanals teilweise illusorisch machen. Die Herstellung erfolgt in vier Dimensionen, und zwar mit innerem Mass von 85 × 85, 120 und 125 sowie 110 × 150 mm; die Länge ist durchweg 80 cm, diejenige des Deckels nur 40 cm, so dass zwei derselben für jedes Formstück erforderlich sind.

Die Verlegung (Fig. 111) geschieht ähnlich wie bei den oben geschilderten Backsteinkanälen und wird in der Fahrbahn etwa 10 bis 20 cm tiefer zu geschehen haben als in den Gehsteigen. Die Grubensohle wird etwa 10 cm breiter als die Formstücke hergestellt, gut planiert und eventuell festgestampft. Die einzelnen Stücke werden dann sorgfältig auf der blossen Erde aneinandergereiht und aussen mit Erde festgeworfen, damit nun eine Verschiebung nicht mehr erfolgen kann. Nachdem die Kabel eingelegt sind, kann der freie Raum mit Sand ausgefüllt werden, erforderlich ist dies jedoch nicht.

Sollen Kabel in Kurven verlegt werden, so verwendet man die in jedem Radius vorrätigen Bogenstücke oder man spaltet gerade Stücke nach Erfordernis schräg ab, so dass auch bei dieser Behandlung keine Lücken entstehen. Sobald mehrere Kanäle in einem Graben verlegt werden, sind dieselben nebeneinander anzuordnen, da man bei dem Übereinanderlegen auf die Zugänglichkeit verzichten müsste.

Ausser den vorher beschriebenen Kabelsteinen aus Thon existieren noch eine grössere Anzahl von Konstruktionen, es seien nur noch erwähnt die von Hotop, Berlin (Fig. 112) und die von Servais & Co., Witterschlick bei Bonn (Fig. 113), die in allen möglichen Kombinationen zusammengesetzt werden können.

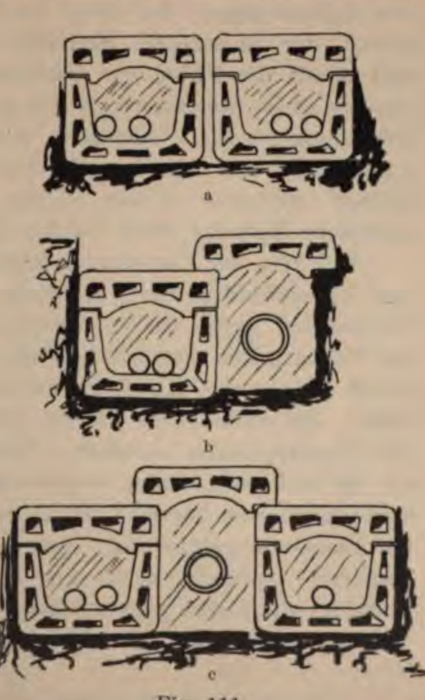


Fig. 111.

65. Verlegen in Beton und Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Beto röhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben b schrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhre stösse wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefähre Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen d ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeit eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen v Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigu zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmu Wayss & Freytag, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stamp beton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden hab (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie d vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sin Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen u bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grosse Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben i sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Ve band gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung v weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das Doulton-System wieder, welches mit dem vorh beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

Wayss & Freytag, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzeru zur Anwendung.[1]) Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sonde wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streif von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbe gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte anni und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Sä werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und d Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. D durch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik Kothe & Co., Köln, konstruiertes S von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeig Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längs des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (F durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Sto mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Ka ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, son sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben H durchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht alle ersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsvermi trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind u und ausgezogen werden können.

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.

65. Verlegen in Beton und Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Betonröhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben beschrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhrenstösse wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefährem Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen der ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeitig eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen von Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigung zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmung Wayss & Freytag, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stampfbeton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden haben (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie die vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die in erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sind. Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen und bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grossem Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben ist sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Verband gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung von weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das Doulton-System wieder, welches mit dem vorher beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

Wayss & Freytag, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzerung zur Anwendung.[1]) Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sondern wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streifen von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbeton gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte annimmt und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Säcke werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und durch Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. Hierdurch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu den Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich das plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik Kothe & Co., Köln, konstruiertes System von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt den Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsöffnung des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig. 114), durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit geschützt wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbindung mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist nicht ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern die Kabel sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Höhe des Kanaldurchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein eine Materialersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung erreicht, trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und auch einzeln einund ausgezogen werden können.

---

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.

65. Verlegen in Beton und Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Betonröhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben beschrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhrenstösse wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefährem Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen der ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeitig eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen von Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigung zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmung Wayss & Freytag, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stampfbeton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden haben (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie die vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die in erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sind. Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen und bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grossem Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben ist sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Verband gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung von weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das Doulton-System wieder, welches mit dem vorher beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

Wayss & Freytag, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzerung zur Anwendung.[1]) Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sondern wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streifen von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbeton gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte annimmt und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Säcke werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und durch Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. Hierdurch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu den Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich das plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik Kothe & Co., Köln, konstruiertes System von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt den Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsöffnung des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig. 114), durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit geschützt wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbindung mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist nicht ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern die Kabel sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Höhe des Kanaldurchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein eine Materialersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung erreicht, trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und auch einzeln ein- und ausgezogen werden können.

---

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.

65. Verlegen in Beton und Cement. Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Betonröhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben beschrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhrenstösse wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefähren Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen der ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichzeitig eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen von Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neigung zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehmung Wayss & Freytag, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Stampfbeton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden haben (Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie die vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die in erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet sind. Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen und bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in grossem Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben ist sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im Verband gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung von weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

Fig. 121 giebt das Doulton-System wieder, welches mit dem vorher beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

Wayss & Freytag, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanzerung zur Anwendung.[1]) Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, sondern wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Streifen von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementbeton gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte annimmt und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen Säcke werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und durch Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. Hierdurch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu den Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich das plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik Kothe & Co., Köln, konstruiertes System von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt den Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsöffnung des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig. 114), durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit geschützt wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbindung mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist nicht ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern die Kabel sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Höhe des Kanaldurchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein eine Materialersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung erreicht, trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und auch einzeln ein- und ausgezogen werden können.

---

1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.

65. Verlegen in Beton und Cement.

Ein weiteres System der Kabelverlegung ist das Einziehen in Bet
röhren. Die Art der Verlegung ist im allgemeinen dieselbe wie oben
schrieben. Gegen das Eindringen von dünnflüssigem Beton in die Röhr
stösse wird während des Einstampfens eine Gummiwalze von ungefähr
Durchmesser der lichten Rohrweite eingeführt und nach dem Trocknen
ersten Betonschicht wieder entfernt. Diese Gummiwalze bewirkt gleichze
eine genaue Zentrierung der Röhren gegeneinander. Um Ansammlungen
Wasser im Rohrkanal zu vermeiden, ist dieser stets in einer kleinen Neig
zum benachbarten Mannloch angelegt.

In neuerer Zeit sind seitens der Beton- und Monierbauunternehm
Wayss & Freytag, A.-G., Neustadt a. d. Haardt, Kabelschutzhüllen aus Sta
beton hergestellt worden, die schon vielfach Verwendung gefunden ha
(Fig. 115). Dieselben sind ebenfalls zweiteilig und werden ebenso wie
vorgenannten Systeme behandelt.

Von der gleichen Firma werden auch Kabelkanäle hergestellt, die
erster Linie für Verlegung von Kabeln in grösseren Anlagen eingerichtet s
Es sind dies Cementkanäle, die besonders im Betriebe der deutschen
bayerischen Reichspost zur Verlegung von Fernsprechkabeln in gros
Masse Verwendung gefunden haben. Die Widerstandsfähigkeit derselben
sehr gross und haben Belastungsversuche, welche sich auf derartige im
band gelegte Kanäle erstreckten, ergeben, dass dieselben eine Belastung
weit über 2000 kg ertragen können (Fig. 116).

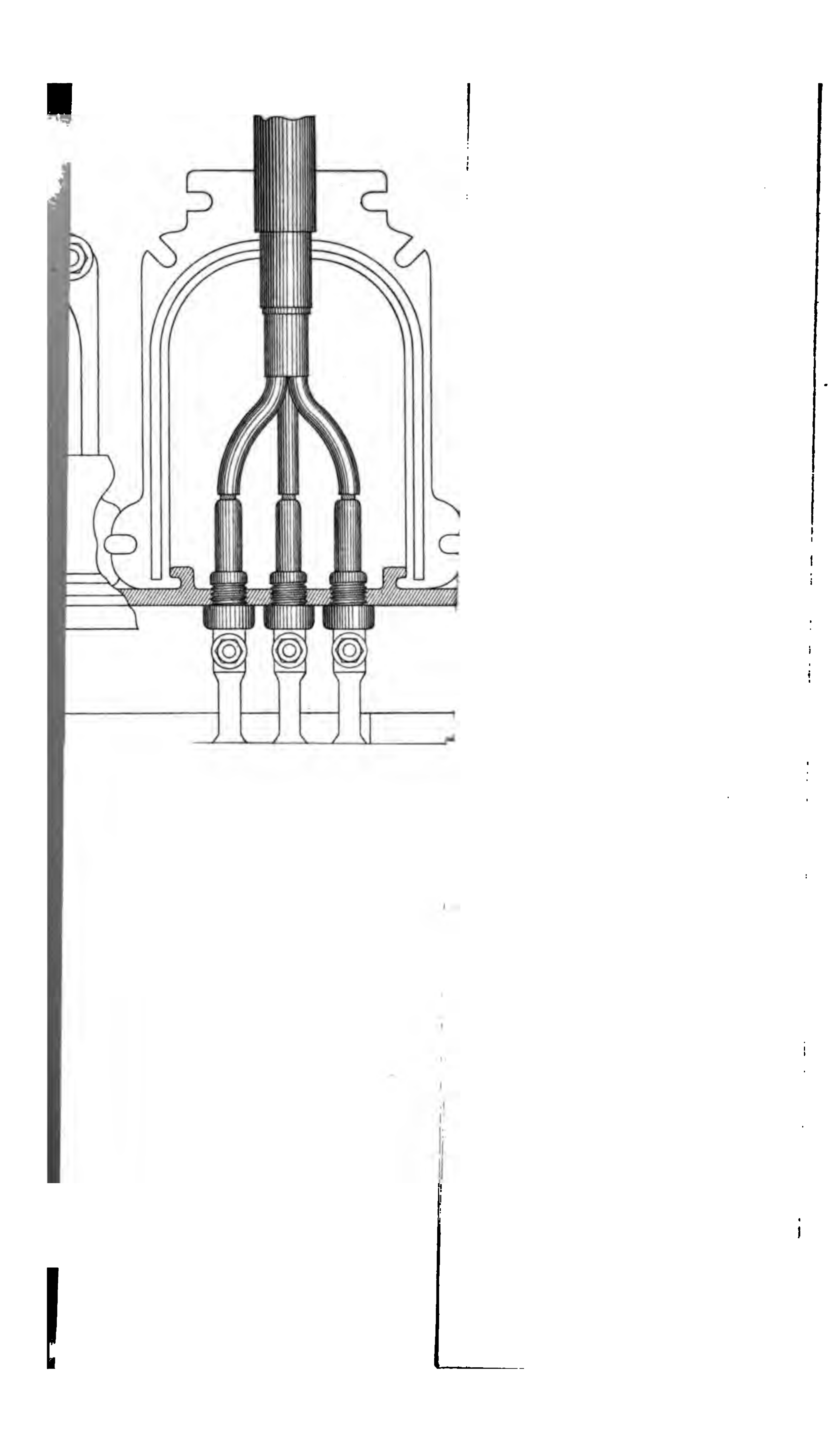
Fig. 121 giebt das Doulton-System wieder, welches mit dem vo
beschriebenen grosse Ähnlichkeit hat.

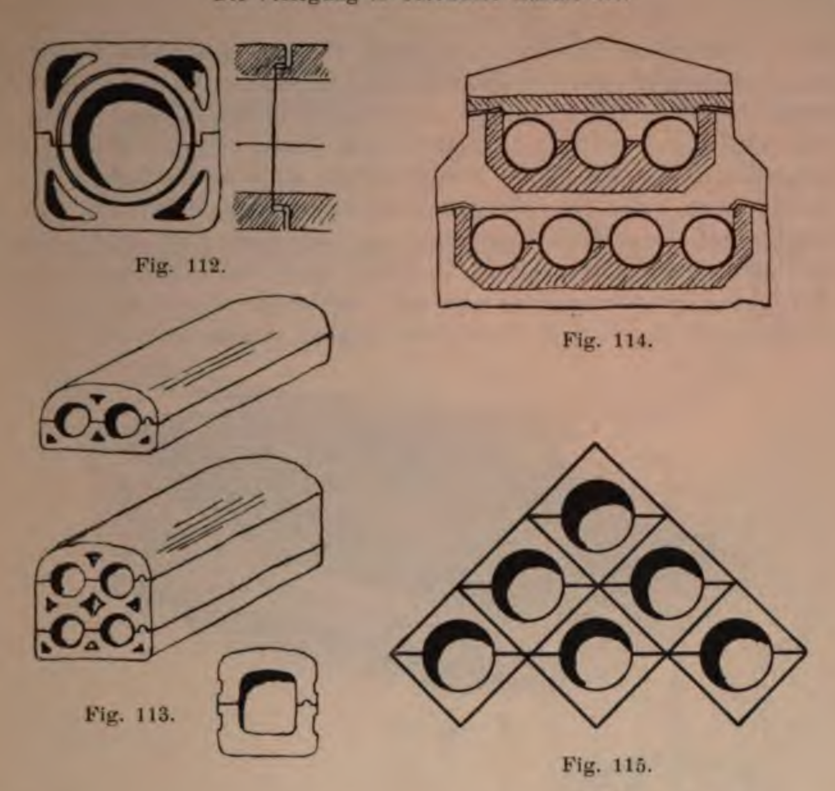
Wayss & Freytag, A.-G., bringen ferner die folgende Kabelpanze
zur Anwendung.[1]) Sie ist nicht aus fertigen Formstücken bestehend, son
wird am Orte der Verlegung erst angefertigt. Auf die Kabel werden Str
von Asphaltpappe oder dergl. und hierauf Jutesäcke, gefüllt mit Cementb
gelegt, der im feuchten Erdreich eine ausserordentlich grosse Härte anni
und somit die Kabel vor Verletzungen sicher schützt. Die einzelnen S
werden etwas übereinander gelegt, damit sie keine Fugen bilden und d
Zwischenlage von Teerpappe vor dem Zusammenbacken geschützt. E
durch wird wie bei den Formsteinen eine gewisse Zugänglichkeit zu
Kabeln erreicht. Dieses System ist besonders vorteilhaft, weil sich
plastische Material dicht an die Kabel anschmiegt.

Ein von der Cementsteinfabrik Kothe & Co., Köln, konstruiertes Sy
von Kabelkanälen zur Verlegung einzelner wie mehrerer Kabel, zeigt
Unterschied gegen die vorbeschriebenen aus Thon, dass in der Längsöff
des Formstückes eine Rinne sowie seitliche Nuten angebracht sind (Fig.
durch welche das Kabel gegen die sich ansammelnde Feuchtigkeit gesc
wird. Die Steine sind kräftig hergestellt und für eine gute Stossverbin
mit Überlappungen versehen. Zur Aufnahme jedes einzelnen Kabels ist
ein für sich vollkommen abgeschlossener Kanal vorhanden, sondern die K
sind durch eine Zwischenwand, welche nur bis zur halben Höhe des K
durchmessers geführt ist, getrennt. Dadurch ist nicht allein eine Mat
ersparnis, sondern auch eine bedeutende Gewichtsverminderung err
trotzdem die Kabel gegeneinander genügend isoliert sind und auch einzel
und ausgezogen werden können.

---

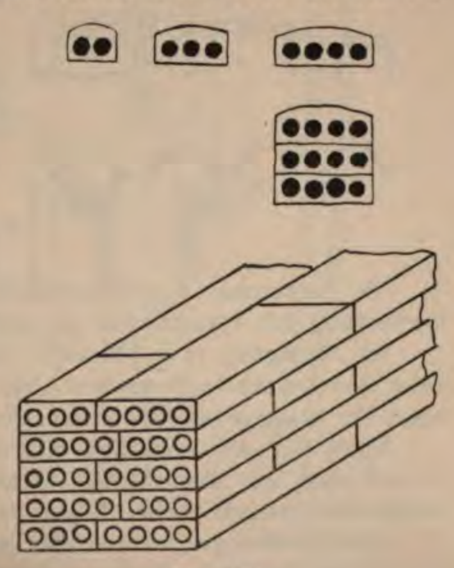
1) Vgl. S. 103, Centrale Stuttgart.




Fig. 112. Fig. 113. Fig. 114. Fig. 115.

Ein besonders leichter Kabelkanal ist von SCHELLBACH-Berlin konstruiert, der zur Verlegung mehrerer Kabel bestimmt ist. Im Innern ist derselbe aus Kunstholz, Holzstein, Pflanzenfasern u. dergl. hergestellt und mit einem Mantel aus Cement oder ähnlicher fester Masse versehen. Die Kabel werden beim Einziehen infolge des verwendeten weicheren Materials nicht verletzt und es können daher angeblich dünnere Bleimäntel für dieselben verwendet werden.

Die bei vielen Kabelkanälen vorkommenden Übelstände, das Eindringen von Wasser und Gas, die Starrheit des Systems u. s. w. zu beseitigen, hat eine weitere Konstruktion von HULTMANN-Stockholm zum Zweck. Die Abdichtung wird dadurch erreicht, dass in die Blöcke Rohre aus einem gas- und wasserdichten Stoffe eingebettet werden; dieselben sind so geformt, dass sie mit einem gewissen Spielraum ineinander geschoben werden können und der verwendete Dichtungsstoff nicht allein den Zwischenraum zwischen den Rohren ausfüllt, sondern sich auch an die Aussenseiten der Rohre fest anschmiegt. Die Dichtungsmasse wird dann durch die die Rohre umgebenden Teile bezw. eine Muffe umschlossen.


Fig. 116.

Eine ausführliche Beschreibung eines anderen besonders in Österreich üblichen Kabelsteines von Hultmann ist zu finden in Dr. Baurs Buch „Das elektrische Kabel“. Fig. 122 giebt ein Beispiel dieser Steine.

Fig. 123 zeigt noch ein Cementrohr der Firma Schmidt & Langen, die im übrigen auch die auf S. 101 beschriebenen Kabelsteine fertigt.

Lavanchy in Vivis (Schweiz) liefert die Kabelsteine, welche Fig. 124 zeigt. Sie bestehen aus einem zweiteiligen Rohr mit verschieden geformten Einsätzen.

Bei allen Cementröhren ist zu beachten, dass das Kabel nie in unmittelbare Berührung mit Cement kommen soll. Dieselben werden daher im Innern mit irgend einer Masse, z. B. Teer oder Asphalt angestrichen.

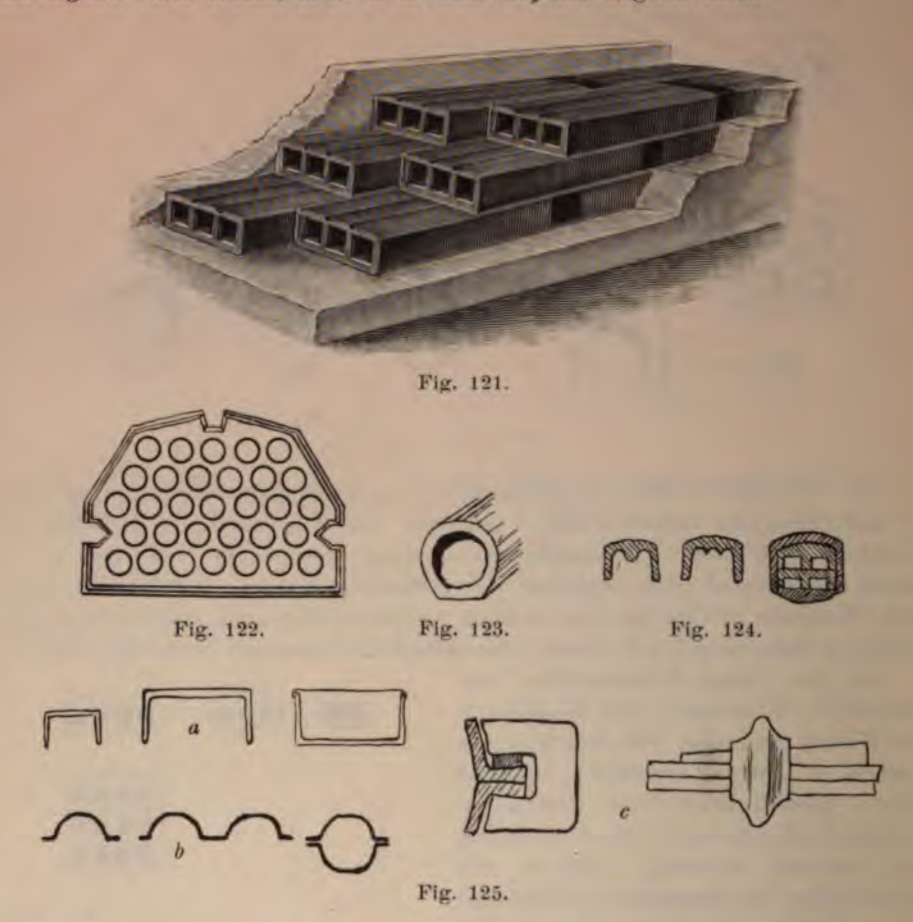


Fig. 121.

Fig. 122. Fig. 123. Fig. 124.

Fig. 125.

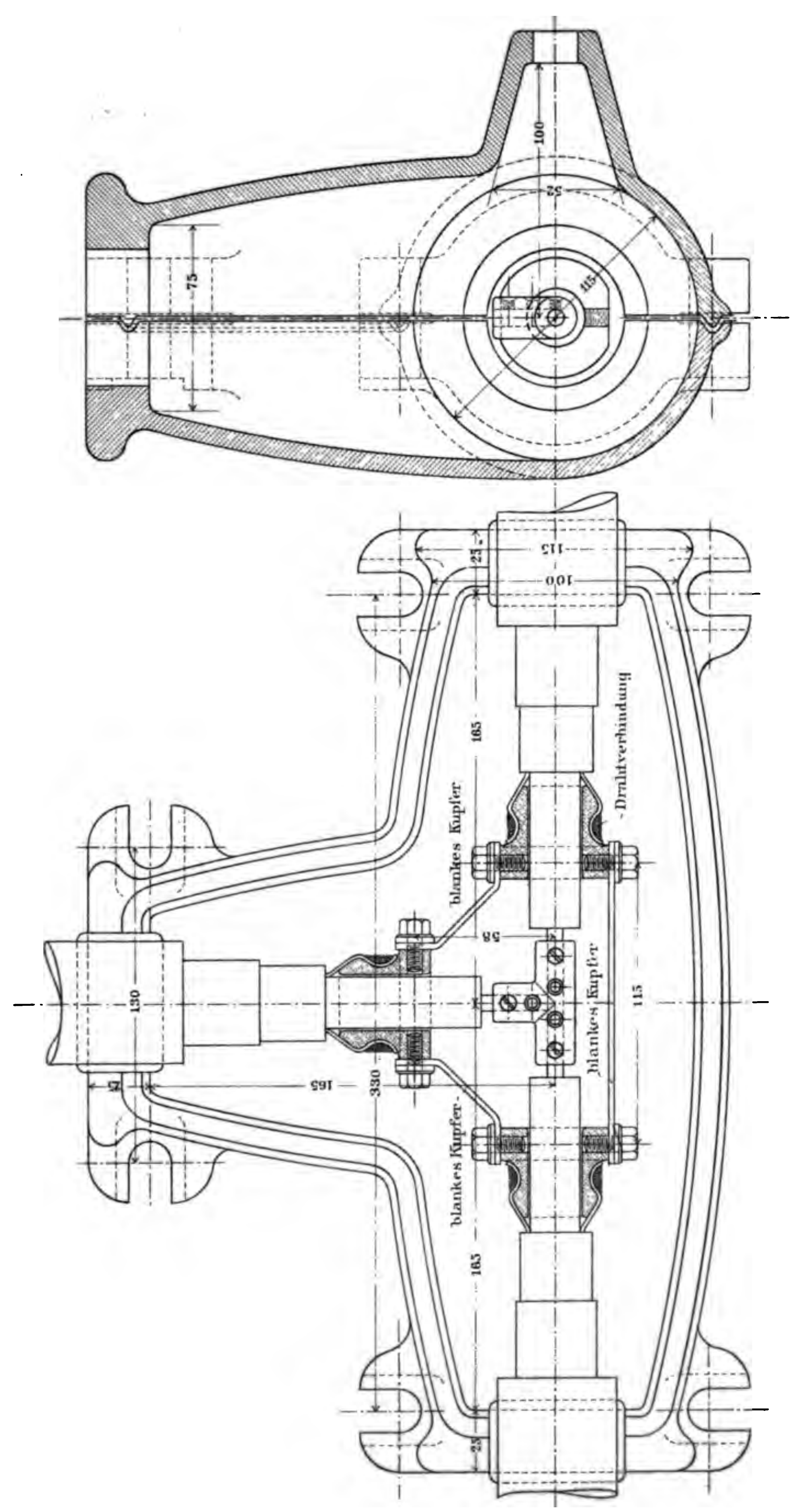
Die Einbettung von Drahtnetzen über den Kabeln oder von diesen in Verbindung mit Stampfbeton ist vielfach als Kabelschutz angewendet.

66. Abdeckungen aus Eisen.

Die Verlegung in ⊔ Eisen in der in Fig. 125 wiedergegebenen Art oder unter den bekannten Zoreseisen bietet viele Vorteile, hauptsächlich aber dann, wenn ein ausserordentlich grosser Druck auf die Kabel erwartet werden kann.

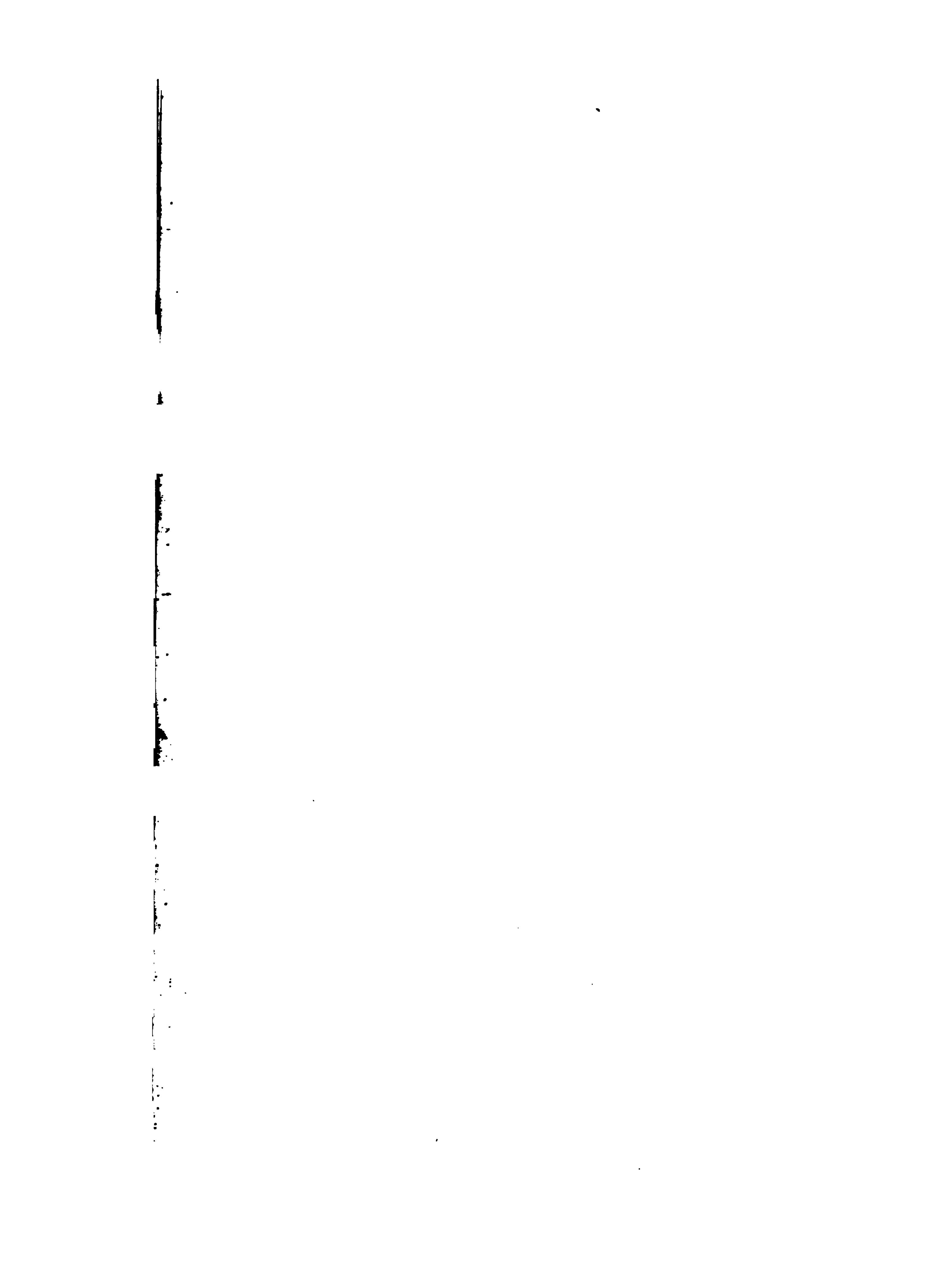
Nicht nur der einseitige eiserne Schutz wird angewendet, sondern es werden auch aus Eisen Kanäle hergestellt, wie z. B. Fig. 125b zeigt. Beide Rohrhälften werden durch Bügel und Keile zusammengehalten (Fig. 125c).

Statt zweiteiliger können aber auch einteilige Rohre Verwendung finden, nur ist bei diesen das Verlegen wesentlich schwieriger als bei den geteilten.



Abzweigmuffe für konzentrische Kabel.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.



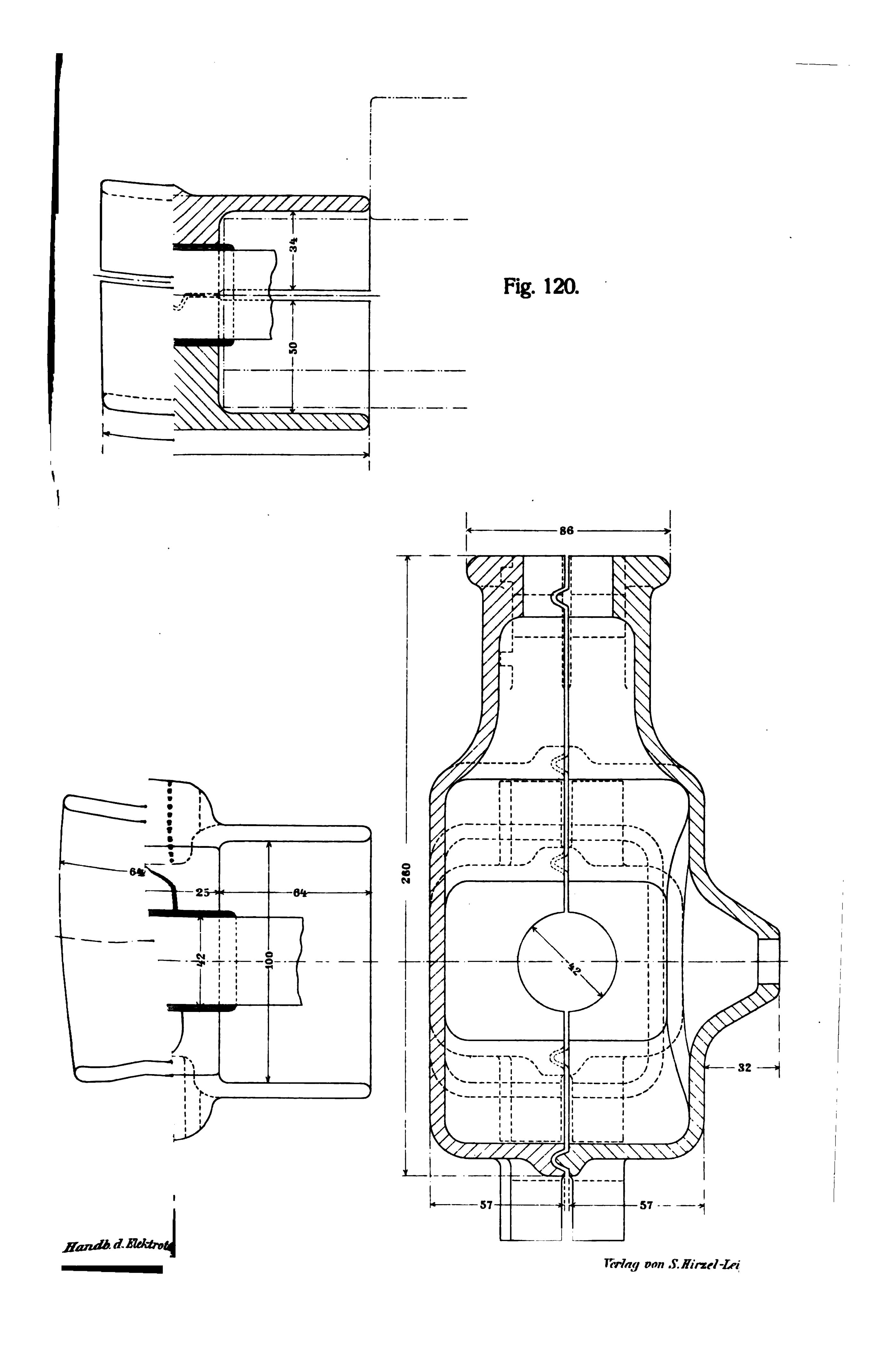
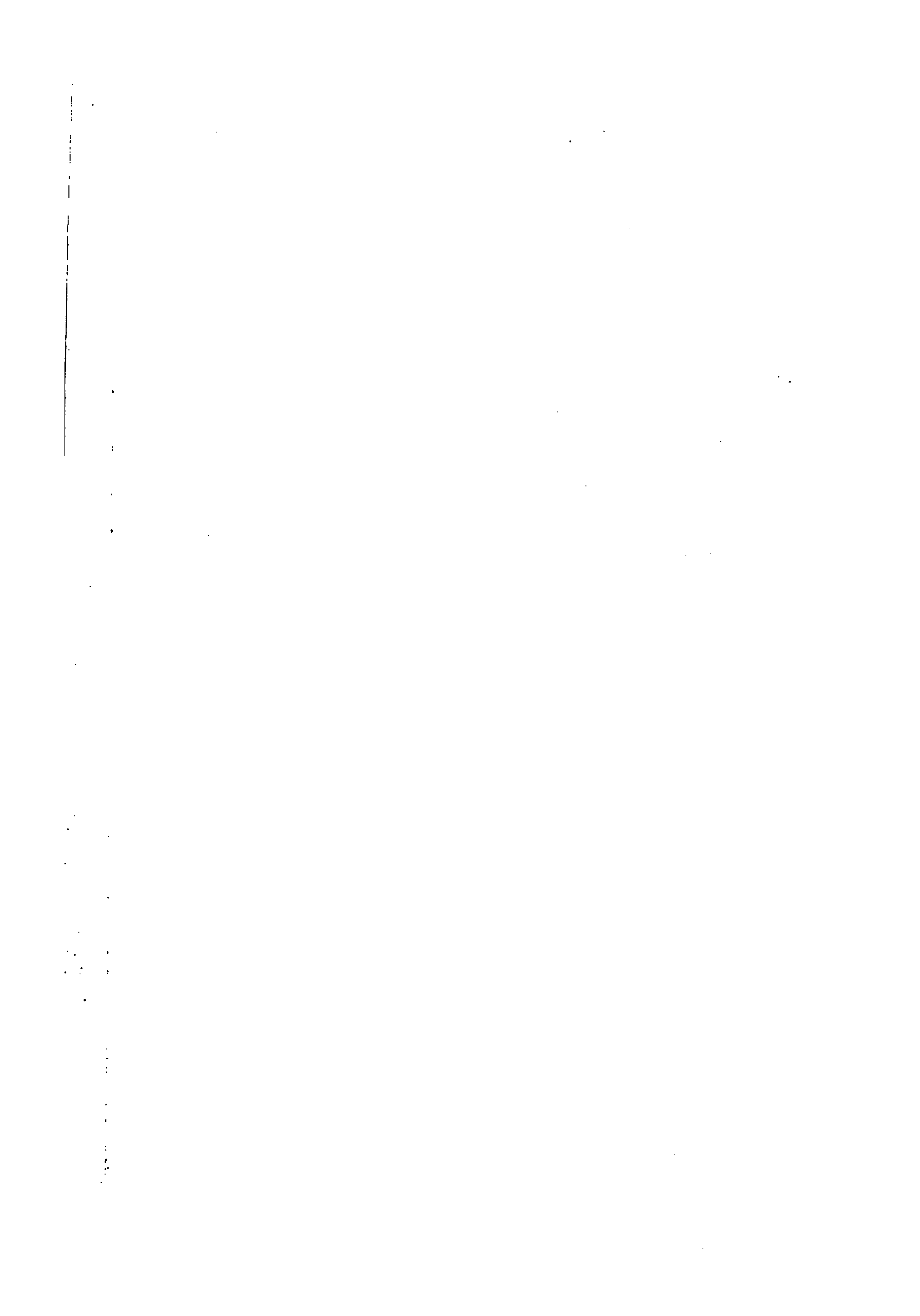


Fig. 120.

Verlag von S. Hirzel-Lei



Beispiele ausgeführter Kabelverlegungen.

67. Kabelverlegung in Stuttgart, Cassel, Plauen, Dresden, Erfurt, Strassburg, Königsberg, Nürnberg.

Es seien noch einige Daten gegeben, in welcher Art einige grössere Elektrizitätswerke ihre Kabel zu verlegen pflegen.

Das Elektrizitätswerk Stuttgart verlegt Kabel verschiedener Stromart oder verschiedener Bestimmung unter den Strassenübergängen und Bürgersteigen stufenförmig angeordnet und in Sand. Die Hochspannungskabel sind durch eine besondere Abdeckung, in Form von langen, schmalen, mit Cement gefüllten Säcken geschützt, wobei das Zwischenlegen von Dachpappe[1]) eine Verbindung des Kabels mit den Cementsäcken verhütet. Die Kosten dieser Abdeckung sind pro laufenden Meter mit Mk. 0·65 angegeben. Die Lagenanordnung der Stuttgarter Kabel ist folgende:

Verteilungskabel . . .	220 Volt,	0·80 m tief,	0·60 m von der Hausfront,
Speisekabel	220 „	0·95 m „	0·70 m „ „ „
Bahnkabel	550 „	1·05 m „	0·85 m „ „ „
Hochspannungskabel .	3000 „	1·30 m „	1·00 m „ „ „

Die Elektrizitätswerke Breslau wenden eine ähnliche Anordnung an, um Starkstrom- und Schwachstromkabel zu trennen. Die ersteren liegen hier in einer Tiefe von 0·75 m, die Telephonkabel seitlich davon, nur 0·50 m tief. Beide Kabel liegen in Sand und sind mit je einer Ziegelschicht abgedeckt. Über der Abdeckungsschicht der Starkstromkabel ist noch ein verzinntes Eisendrahtnetz von circa 50 cm Breite eingelegt, welches, offenbar zur Kennzeichnung der Gefahr, circa 0.25 m unter Bürgersteigoberfläche liegt. Die beiden Starkstromkabel liegen 0·15 m voneinander, der Abstand derselben von den Telephonkabeln beträgt 0·20 m.

Das Elektrizitätswerk Cassel verwendet Cementformstücke, wie diese auch von der Reichspost verwendet werden. Diese Kabelschutzkanäle sind ein- oder zweiteilig und enthalten meist je drei nebeneinander angeordnete runde Löcher zur Aufnahme der Kabel. Die Herstellungskosten dieser Abdeckungsart sind pro laufendes Meter auf Mk. 2·00 angegeben.

Die Stadt Hannover verwendet ebenso wie Stuttgart Cementbetonsäcke mit daruntergelegter Dachpappe.[1]) Die Kosten sind bei Verlegung eines Kabels auf Mk. 0·55, bei zwei nebeneinander liegenden auf Mk. 0·75 pro laufenden Meter angegeben.

Plauen i. V. verwendet als Kabelschutz glasierte halbe Thonröhren (Thonschalen) und giebt die Kosten mit Mk. 0·70 pro laufenden Meter an.

Die Stadt Dresden hat zweiteilige Cementschalen ohne Dachpappeneinlage als Abdeckung für Hochspannungskabel in Gebrauch.

Das Elektrizitätswerk Erfurt verwendet zum Teil schmiedeeiserne Röhren, die in der Länge geteilt sind und die nach Einlegung von zumeist zwei Gleichstromkabeln und einer blanken Leitung, durch Zwingen und Keile an den Längsrändern zu einem festen Rohr verbunden werden.[2]) Die Kosten dieses Kabelschutzes sollen sich pro laufenden Meter auf Mk. 1·15 belaufen.

Strassburg hat für Einzelkabel einen ähnlichen Schutz verwendet, nur sind die Röhren sechseckig, bestehen aus Zoreseisen und sind im Schnitt

---

1) Vgl. S. 100.
2) Vgl. S. 102, Fig. 125.

nicht durch Keile, sondern durch Schrauben verbunden. Der Preis soll sich pro laufenden Meter Abdeckung auf Mk. 2·96 belaufen. Vielfach sind aber noch Kabelsteine, bestehend aus Thonfaçonschalen, oder aus Beton gepresste Kabelsteine verwendet. Erstere kosteten Mk. 1·44 bis 1·68 und die letzteren Mk. 1·30 pro laufenden Meter fertiger Abdeckung.

In Königsberg ist das unterirdische Leitungsnetz nach dem Fünfleitersystem angeordnet; die Leitungen bestehen aus blanken Kupferschienen, welche auf Porzellanisolatoren montiert und in Monierschächten geführt sind.

Ausserdem werden in Königsberg Normal-Kabelsteine verwendet, und zwar vorzugsweise bei Kabelkreuzungen u. s. w.; ein Meter Abdeckung, wie diese den Zwecken des Werkes dient, kostet Mk. 1·60.

In Fig. 111a ist eine Verlegung der Kabelkanäle dargestellt, wie sie ähnlich z. B. im städtischen Elektrizitätswerk Nürnberg erfolgt ist und zwar an allen Strassenübergängen und in Strassen, die mit Asphalt oder Holzpflaster versehen sind, bei denen ein späteres Aufreissen möglichst vermieden werden soll. An Strassenübergängen liegen an mehreren Stellen 6—8 solcher Kanäle nebeneinander. In jedem Kanal liegt nur ein Kabel und ein Eisendraht, durch welch letzteren das Einziehen des Kabels erfolgt. Das Innere des Kanals ist frei, um das Kabel leicht herausziehen zu können.

Die in Fig. 111 a—c dargestellten Verlegungsarten sind auch vom Elektrizitätswerk der Stadt Luzern ausgeführt. Die armierten Kabel für Hochspannung sind neben, oder bei Verlegung mehrerer Kanäle zwischen diesen angeordnet, wie aus Fig. 111 b und c zu ersehen ist. Im ersteren Falle liegt nur die eine Seite des verwendeten Deckels auf dem Nebenkanal auf, die andere dagegen auf dem Erdreich; im zweiten Falle ist der Deckel durch zwei Kanäle gestützt und bildet dieser Raum einen Kanal für sich.

Bei Wechsel- und Drehstromanlagen lassen sich noch weitere Anordnungen treffen, indem man einen |_⌐¬_| oder einen ‾|_|‾ förmigen Graben aushebt. Bei der ersteren Form verlegt man auf die mittlere Erhöhung z. B. die Speisekabel und in die beiden Vertiefungen je die Hoch- und Niederspannungsverteilungskabel, während man bei der zweiten Form das Speisekabel in die mittlere Vertiefung und die Verteilungskabel in die beiden Erhöhungen legen würde.

68. Bettungspraxis in England.

Interessant ist eine Zusammenstellung der Bettungspraxis in England von Dr. BAUR.[1])

Die 52 Elektrizitätswerke in London und Umgebung, die in den Jahren 1883—1899 gebaut worden sind, haben ihre Kabel meistens nach zwei oder drei verschiedenen Systemen eingebettet. Gepanzerte Kabel sind grösstenteils ohne Bettung verlegt.

Die nachstehende Zusammenstellung giebt eine Übersicht, wie vielmal, d. h. von wie vielen Werken die einzelnen Bettungsarten angewendet sind:

Direkte Bettung in Erde	19 mal
Bettung in Thon und Steingut	27 „
„ „ Eisenrinnen	12 „
„ „ Eisenröhren	13 mal
„ „ Holz	3 „

1) Dr. C. BAUR, Das elektrische Kabel, Berlin 1903, S. 213.

Bei 25 Elektrizitätswerken, die in England, Schottland und Irland gegenwärtig[1]) im Bau begriffen sind, kommen vor:

Direkte Bettung in Erde	. . . .	2 mal
Bettung in Thon und Steingut	. . . . . .	8 „
„ „ Eisen	. . . .	5 „
„ „ Holz	. . . .	12 „

Hieraus also ist ersichtlich, dass die Anzahl der gepanzerten Kabel abnimmt und die Anzahl der in Holz verlegten nicht armierten zunimmt.

Die Verlegung von Flusskabeln.

69. Herstellung der Kabelrinne.

Wesentlich grösseren Gefahren als die Landkabel sind diejenigen Kabel ausgesetzt, welche in Flüssen oder Meeren verlegt sind. Für diesen Band kommen jedoch die umfangreichen und schwierigen Verlegungen transatlantischer Kabel nicht in Betracht. Bezüglich dieser sei auf die zahlreiche Litteratur verwiesen.[2]) Starkstromkabel werden nur in verhältnismässig geringen Längen in Wasser verlegt, und zwar meistens bei Kreuzungen mit Flüssen und Meeresarmen.

Dass den Flusskabeln ein besonders sicherer Schutz gegen mechanische Verletzungen durch die Art ihrer Konstruktion gegeben ist, wurde bereits an anderer Stelle besprochen.[3]) Durch die Art der Verlegung muss aber auch bei diesen Kabeln das Schutzmittel ergänzt werden, und zwar wird eine besondere Kabelrinne ausgebaggert. Je nach der Art des Flussbettes ist dies mehr oder weniger schwierig. Felsiger Grund ist am ungünstigsten, da dann das Kabel nicht eingebettet werden kann, loser Sand ist aber auch ungünstig, zumal bei schnell strömenden Flüssen, da dann der ausgebaggerte Graben sehr leicht vor dem Einbringen des Kabels zugeschwemmt wird.

Die ungünstigsten Stellen eines Flusskabels sind die, wo dieses aus dem Wasser zum Lande aufsteigt. Es soll nicht stark durchhängen, sondern sich allmählich auf den Boden senken, so dass am Ufer ebenfalls tiefgehende Erdarbeiten erforderlich werden (vgl. Fig. 126 a und b, Verlegung eines Flusskabels durch den Rhein durch die Land- und Seekabelwerke). Anstatt dieser Anordnung können am Ufer auch eiserne Rohre in die Böschungen verlegt werden, die sich mit sanfter Neigung zum Flussbett herabsenken.

Wird ein Flusskabel mit einem Landkabel verbunden, so ist zweckmässig, das letztere zuerst zu verlegen und alles so weit herzurichten, um nach dem Versenken des ersteren beide Kabel gleich verbinden zu können.

70. Die Verlegung.

Bei schmalen Flüssen wird die Verlegung anders gehandhabt als bei breiten. Bei den ersteren werden im Fluss in der Richtung der Kabelstrecke Fahrzeuge verankert, auf denen sich Arbeiter befinden. Am Ufer wird die Kabeltrommel aufgestellt, das Kabel mit Tauen gefasst, über den Fluss ge-

1) 1903.

2) z. B. Wietz, Die isolierten und elektrischen Leitungsdrähte und Kabel, S. 129 und Hdb. XII, S. 721.

3) Hdb. VI, 1, S. 106, 184.

zogen und dann versenkt, also in ähnlicher Art, wie sie auch bei der Verlegung auf dem Lande üblich ist.

Bei breiteren Flüssen werden die Kabeltrommeln auf breite Kähne gestellt, von denen unter Umständen mehrere miteinander verbunden sind



Fig. 126 a.

(vgl. Fig. 126c, Kabelverlegung in Rotterdam durch Siemens & Halske, A.-G.). Zunächst werden die Enden ans Ufer gezogen, und zwar bis zu der Stelle, an welcher der Anschluss an das Landkabel stattfinden soll, und dort gut verankert. Dann werden die Fahrzeuge, der Kabelstrecke folgend, langsam

fortbewegt und in gleichem Masse rollt das Kabel ab. Die Bewegung des ablaufenden Kabels muss jedoch im Einklang mit der Fortbewegung des Schiffes stehen, da sonst zu viel Kabel abläuft und sich dann am Grunde in Schleifen legt. Man bremst daher die Trommeln am Umfang, muss aber



Fig. 126 b.

auch dafür sorgen, dass nicht zu grosse Spannungen im Kabel auftreten, um Beschädigungen zu vermeiden.

Während der Verlegung des Kabels lässt man in der Regel die Lage desselben durch einen Taucher feststellen, ob es sich auch genau in die



Fig. 126 c.

Baggerrinne legt. Nach der Verlegung ist es schwieriger, wenn auch nicht unmöglich, seine Lage zu verbessern.

Ist es nicht gelungen, die Rinne tief genug auszubaggern, um das Kabel durch eine tiefe Lage gegen Beschädigungen durch schleppende Anker zu schützen, so wird Gestein als Schutzschicht darüber versenkt. Auch eiserne Rohre sind zu diesem Zweck angewendet worden, und zwar in Form von Halbrohren, die miteinander durch Schrauben verbunden wurden.

An den Ufern findet später eine gute Verankerung statt, damit das Kabel aus seiner Lage nicht herausgerissen werden kann. Verbindungsstellen in diesen Kabeln werden auf einem Schiff hergestellt, in der gleichen Art wie bei den Landkabeln, jedoch werden die Armaturdrähte in besonders sicherer Art miteinander verspleisst, damit diese Stelle keine geringere Zugfestigkeit aufweist als das Kabel selbst.

Vorteilhaft ist es, um Flusskabel gegen schleppende Anker zu schützen, die Schiffer durch Warnungstafeln am Ufer auf die Lage des Kabels aufmerksam zu machen.

Die Montage der Grubenkabel.[1])

71. Das Einhängen.

Wie bereits vorher erwähnt, werden die Kabel im Hinblick auf die schwierige Montage von vornherein so konstruiert, dass ihre Eisenarmierung die genügende Festigkeit hat, um das Kabel in seiner Fabrikationslänge tragen zu können. Die Enden der Armaturdrähte werden zu einer Öse (Fig. 127), einem sogenannten Kuhmaul zusammengedreht, an welchem die zur Anhängung erforderlichen Seile befestigt werden. Man bringt das Kabel, nachdem man es von der Kabeltrommel abgewickelt hat, auf die Trommel einer Winde, von der man es ablaufen lässt, wobei gut und sicher gebremst werden muss. Hängt das Kabel dann seiner ganzen Länge nach im Schacht, so wird es von unten herauf sofort an den bereits vorher angebrachten Kabelschellen befestigt. In vielen Fällen wird jedoch diese Art des Einhängens keine Verwendung finden können, da nicht immer die erforderliche Winde vorhanden ist. Man verwendet dann ein Hilfsseil, wenn möglich das Förderseil, an welchem das Kabel angeschellt wird. Das Hilfsseil befindet sich auf einer kleinen Winde, während das Kabel direkt von der Kabeltrommel abläuft. Die Verbindungsschellen zwischen beiden werden etwa alle 10 m angebracht, dazwischen jedoch noch drei bis vier Drahtbunde, nach der Art, wie sie Fig. 128 zeigt. Um zu vermeiden, dass die Isolation zerdrückt wird und das Kabel rutscht, werden kleine Holzbrettchen zwischen Bindedraht und Kabel

Fig. 127.

Kabel
Förderseil

Fig. 128.

1) Über die Verlegung von anderen Leitungen als Kabel in Bergwerken vgl. diese Hdb. VI, 2.

gelegt (Fig. 128). Während des Einhängens der Kabel muss am Anfang desselben ein Mann mit einsteigen, welcher das Kabelende führt. Wird das Kabel mit einem Hilfsseil herabgelassen, so wird auch jede Verbindungsschelle (Fig. 129 a) von einem Mann begleitet, damit das Kabel an keiner Stelle der Schachtzimmerung hängen bleibt. Es könnte sich sonst eine Schleife bilden, die es erforderlich macht, das Kabel wieder heraufzuholen. Es kann auch vorkommen, dass die festgesetzte Schelle plötzlich abrutscht, wobei auf das hängende Kabel ein solcher Zug ausgeübt werden könnte, dass es zerreist.

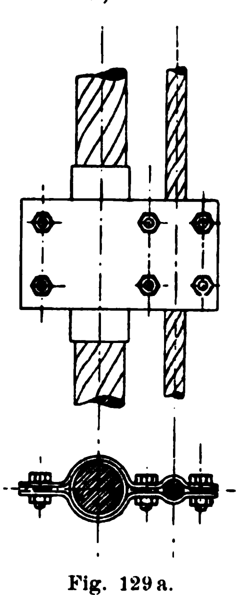


Fig. 129 a.

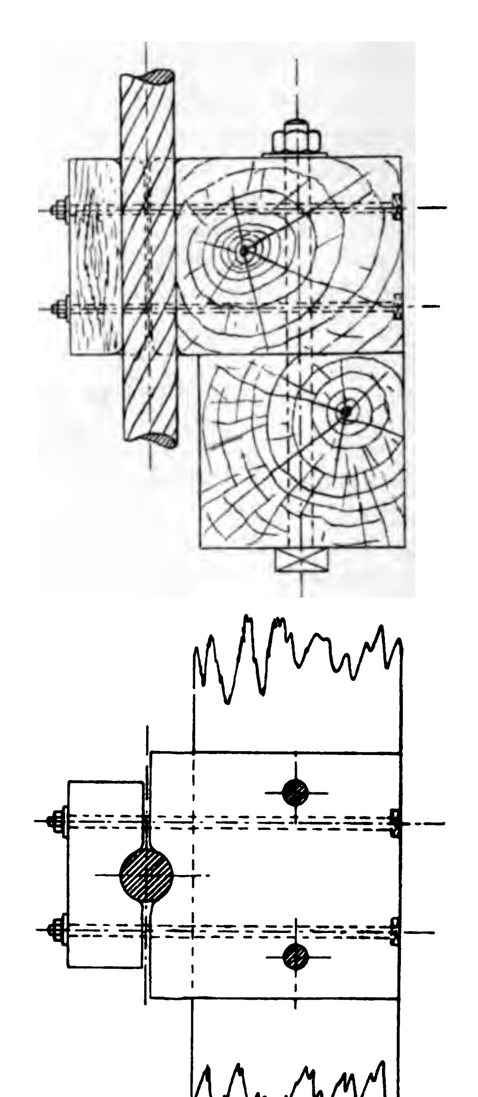


Fig. 129 b.

Wenn die Schächte breit genug sind, dass es möglich ist, die ganze Kabeltrommel in den Schacht herunterzulassen, so empfiehlt sich das Heraufholen des Kabels von unten. Die Kabeltrommel wird auf der Sohle des Schachtes aufgestellt, das Hilfsseil mit der aus den Armaturdrähten gebildeten Öse verbunden und langsam emporgewunden, wobei die Kabeltrommel nachgedreht wird.

Bei Kabeln geringerer Querschnitte kann wohl auch die Kabeltrommel auf der Förderschale selbst aufgestellt werden, das Kabelende wird oben befestigt und dann lässt man es durch sehr langsames und vorsichtiges Herunterlassen der Förderschale von der Kabeltrommel ablaufen.

72. Befestigung des eingehängten Kabels.

Bevor jedoch mit der Verlegung und Einhängung des Kabels begonnen wird, müssen die Schellen, die zur Befestigung des Kabels dienen sollen,

angebracht sein, damit nach Beendigung des Einhängens die Kabel sofort sachgemäss befestigt werden können.

Für die Befestigung der Schellen wird in der Regel die Schachtzimmerung verwendet (Fig. 129b), auf die sich der eine Teil der Klemme stützt. Ist die Befestigung am Holz nicht möglich, so werden ins Gestein eincementierte Bolzen als Träger verwendet.

Um dem Kabel genügenden Halt zu geben, darf die Entfernung zwischen den einzelnen Befestigungsstellen nicht mehr als 6 m betragen.

Die Klemmen selbst werden meistens aus hartem Holz angefertigt, da sich dieses im Schacht am besten hält. Sie müssen das Kabel auf einer Länge von mindestens 15 cm umfassen; die Bohrung muss eine solche Weite haben, dass auf das Kabel kein zu starker Druck ausgeübt wird. In erhöhtem Masse gilt dies, wenn eiserne Schellen verwendet werden und ist es in diesem Fall sogar empfehlenswert, das Kabel an den Befestigungsstellen mit einigen Lagen von Juteband zu umwickeln. Die hölzernen Schellen werden imprägniert, in der Regel mit Kreosot, die eisernen Schellen nach der Verlegung gut mit Teer angestrichen.

Es sei hier noch darauf hingewiesen, dass es beim Abtäufen von Schächten und für provisorische Zwecke, soweit es sich nicht um Schlagwettergruben handelt, nicht erforderlich ist, Kabel zu verlegen, sondern die Anbringung anderer Leitungen, die aber mit Gummi nahtlos umpresst sein müssen, zulässig ist. Für derartige Zwecke verwenden Siemens & Halske eine flache Leitung, bei welcher zwei Gummiaderleitungen nebeneinander liegen, zwischen denen ein Tragseil angeordnet ist. Die flache Form der Leitung begünstigt das Aufwickeln derselben auf eine Winde, von der sie, je nachdem die Abtäufarbeiten vor sich gehen, abgelassen werden kann. Am unteren Ende der Leitung werden Beleuchtungskörper angebracht.

Schwierig ist die Herstellung von Verbindungsstellen in dem senkrecht herunterführenden Kabel. Die Muffen müssen sicher befestigt und ausgegossen werden. Um insbesondere sicher zu sein, dass sie vollständig ausgegossen werden, empfiehlt es sich, dieselben horizontal anzuordnen und die Kabel in einem schlanken Bogen heranzuführen. Lässt sich dies nicht ausführen und müssen die Muffen senkrecht angebracht werden, so muss zum Ausgiessen ein besonderer Trichter verwendet werden.

Kosten für Kabelverlegungen.

73. Kosten der Erdarbeiten, Abdeckungen, Verbindungsstellen.

Nach Uppenborn[1]) betragen die Kosten für Kabelverlegungen:

1. Herstellen der Kabelgräben bis 70 cm Tiefe und 60 cm Breite, d. h. Aufbrechen der Pflasterung, Ausheben des Erdreiches, Einfüllen einer 20 cm hohen Sandschicht, Zufüllen und Feststampfen mit gewöhnlichem Erdreich, sowie Abfuhr des überflüssigen Materials pro Meter Mk. 1·50.
2. Einbetten der Kabel und Abdecken derselben mit Betonplatten oder Ziegelsteinen. Ohne Material pro Meter Kabel Mk. 0·15.

---

1) Uppenborn, Kalender für Elektrotechnik 1905, S. 266, vgl. auch ETZ 1902, S. 260.

3. Betonplatten 8 cm dick mit Eiseneinlage (zum Abdecken der Kab

Breite	20 cm,	Preis	pro	Meter	Mk.	0·60
„	25 „	„	„	„	„	0·70
„	30 „	„	„	„	„	0·85
„	40 „	„	„	„	„	1·15

4. Wiederherstellung des Pflasters bei Verwendung des brauchbar materials:

a)	Makadam	pro m² M
b)	Kleines Steinpflaster	„ „ ,
c)	Granitpflaster in Sandbettung	„ „ ,
d)	„ „ „ mit Mastixausguss .	„ „ ,
e)	Cement-Trottoir	„ „ ,
f)	Asphalt-Trottoir	„ „ ,
g)	Klinkerpflaster in Zementmörtel mit Betonunterlage	„ „ ,
h)	„ „ „ ohne „	„ „ ,

5. Herstellen von Kabelverbindungen inkl. Material und Montage:

	Muffen:		Lötstellen:	
	einpol. Mk.	zweipol. Mk.	einpol. Mk.	zweip Mk
Bis 50 mm² Querschnitt	15·—	22·—	7·—	12·
„ 100 „ „	20·—	30·—	8·—	15·
„ 200 „ „	25·—	40·—	10·—	18·
„ 500 „ „	40·—	50·—	12·—	20·

7. Herstellung von Kabelabzweigungen inkl. Material und Montage:

	Muffen:		Lötstellen:	
	einpol. Mk.	zweipol. Mk.	einpol. Mk.	zweip Mk
Bis 50 mm² Querschnitt	20·—	28·—	8·—	15·
„ 100 „ „	25·—	35·—	9·—	17·
„ 200 „ „	35·—	45·—	10·—	19·
„ 500 „ „	50·—	70·—	12·—	22·

Selbstverständlich werden die angegebenen Kosten den örtliche ständen, der Bodenbeschaffenheit und auch der Jahreszeit entsprechen variieren und es lassen sich daher auch die mittleren Werte mit Sic nicht angeben. Die vorstehend genannten Zahlen sollen daher auch r gefähre Anhaltspunkte darstellen und man wird bei genaueren Berech stets von Fall zu Fall den Verhältnissen entsprechend zu entscheiden

Freileitungen.

Unter Freileitungen[1]) versteht man diejenigen Leitungen, welche ausserhalb der Gebäude und ohne besonderen Schutz gegen die Unbilden der Witterung montiert sind. Sie werden teils auf Gestängen an den Gebäuden selbst, teils an besonderen Masten und zwar auf Isolatoren verlegt.

Leitungsmaste.

Hölzerne Maste.

74. Art der Hölzer. Fällungszeit.

Als Leitungsmaste werden hauptsächlich Nadelhölzer, seltener Laubhölzer verwendet.

Von den ersteren haben Kiefer (pinus silvestris), Fichte (pinus abies und abies excelsa), Lärche (pinus larix), Tanne (pinus picea, abies pectinata, picea vulgaris) die meiste Verbreitung gefunden; von Laubhölzern werden, wenn auch selten, Eiche (quercus), Kastanie (castanea vesca) und mitunter auch Buche verwendet.[2])

Als Fällungszeit der Stangen werden im allgemeinen die Wintermonate (November bis Februar) als am günstigsten bezeichnet. Hierfür scheinen hauptsächlich praktische Gesichtspunkte massgebend zu sein, weil im Winter billigere Arbeitskräfte zu haben sind und die Beförderung der geschlagenen Hölzer aus den Wäldern in den Wintermonaten am leichtesten und billigsten auszuführen ist.

Da die Hölzer nur in den Monaten April bis Oktober trocknen, in der Zeit von Oktober bis April dagegen auf ein Trocknen nicht gerechnet werden kann, so ist auch dieser Umstand für die Winterfällung von praktischer Bedeutung. Sollen hingegen die Maste mit Kupfervitriol imprägniert werden, so ist schon durch die Art dieser Imprägnierung[3]) die Fällung in der Saftzeit (also im Sommer) erforderlich.

75. Beschaffenheit der Stangen. Lebensdauer.

Als Maste für elektrische Anlagen können in erster Linie nur gerade gewachsene und gesunde Stämme ohne Astlöcher und Spalten verwendet werden; sie dürfen weder schwammig oder kronschälig sein. Hauptbedingung ist, dass die Maste wirkliche Stammenden der Bäume waren.

1) § 3 der Sicherheitsvorschriften.
2) Näheres siehe Hdb. XII, S. 628.
3) Näheres siehe Hdb. VI, 2, S. 115.

Nach dem Schälen der Stämme wird das untere Ende senkrecht zur Mastmitte durchschnitten, das Kopfende kegelförmig zugeschnitten; das letztere wird später gern mit einem kleinen Zinkdach benagelt.

Die Maste haben, wenn sie in diesem rohen Zustand verwendet werden, meistens nur eine beschränkte Lebensdauer von etwa 4—5 Jahren;[1]) Eichen erhalten sich jedoch bedeutend länger, werden in der Regel auch nicht imprägniert, haben aber selten geraden Wuchs.

Holzmaste sind der Zerstörung durch Fäulnis, hauptsächlich aber an den Stellen ausgesetzt, die an der Erdoberfläche und wenig unter dieser liegen.

Es ist daher zumeist erforderlich, um die Lebensdauer der Stangen zu erhöhen, dieselben mit fäulnishindernden Substanzen zu tränken.

Die Fäulnis, die entweder eine trockene (Vermoderung) oder nasse sein kann, wird eingeleitet durch die Zersetzung gewisser Bestandteile des Holzsaftes, welche sich dann auf die Holzfaser überträgt, die an und für sich nicht zur Fäulnis neigt, da sie nur aus Kohlehydraten besteht. Während sich die stickstoffhaltigen Teile des Holzsaftes, wie Pflanzenleim, Kleber und Eiweiss, überaus leicht zersetzen, sind die stickstofffreien, wie Gummi, Zucker, Dextrin, der Fäule nicht ausgesetzt, die harzigen Bestandteile arbeiten ihr sogar entgegen.

Die eigentlichen Urheber der Fäule (Fermentwirkungen) sind mikroskopische Organismen, die in den stickstoffhaltigen Bestandteilen reichliche Nahrung finden. Ihre Vernichtung hat die Verhinderung der Fäule zur Folge oder sie wird doch zum mindesten so lange aufgehalten, bis sich unter dem Einfluss von Luft und Feuchtigkeit neue Erreger angesiedelt haben.

Imprägnierung der Holzmaste.

76. Imprägnierung durch natürliche Harzansammlung.

Durch die Anwendung fäulnishindernder Substanzen wird den Keimen die Lebensbedingung entzogen. Dies geschieht so lange, als die Imprägnierung ihre Wirkung behält.[2])

In dem norwegischen Fachblatt „Telegraph Bladet“ wird berichtet, dass in Norwegen die zur Fällung bestimmten Bäume im Sommer des der Fällung vorausgehenden Jahres bis zu etwa 3 m Höhe vom Erdboden aus abgeborkt werden, wodurch der Stamm, insbesondere dessen unteres Ende, sehr reich mit Harz durchsetzt wird. Die Harzabscheidung wird infolge der Überfüllung der Zellen so gefördert, dass dasselbe aus dem Stamm ausscheidet. Der starke Harzgehalt des später in der Erde steckenden Endes des Stammes ist dann imstande, die aus diesen Stämmen gewonnenen Stangen längere Zeit gegen Fäulnis zu schützen. Die Kosten werden nicht wesentlich höher gegenüber denen frischer Stangen, da sich die sowieso erforderliche Arbeit des Abborkens auf zwei Jahre verteilt.

77. Imprägnierungsarten.

Die Dauer der Schutzwirkung der Imprägnierung wird nun von der Wahl des Tränkungsmittels abhängen. Je leichter dasselbe im Wasser löslich ist, um so schneller wird es ausgelaugt; ebensowenig vermag die Tränkung mit leicht flüchtigen Ölen einen dauernden Schutz zu gewähren.

1) Siehe auch ETZ 1905, S. 147.

2) Näheres siehe „Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung 1897“.

Die Imprägnierung der Holzmaste erfolgt zurzeit meistens mit einem der folgenden Mittel:

1. Kupfervitriol (Boucherie),
2. Zinkchlorid (Burnett),
3. Karbolsäurehaltiges Teeröl (Bethell),
4. Doppel-Chlor-Quecksilber (Kyan),
5. Zinkchlorid und karbolsäurehaltiges Teeröl (Verfahren von Rütgers),
6. Lauge aus kupferhaltigem Eisenvitriol, schwefelsaure Thonerde und Kainit (Verfahren nach Hasselmann).

1. Imprägnierung mit Kupfervitriol.

Die Zubereitung der Stangen mit Kupfervitriol ist im Hdb. XII, S. 629 ff. ausführlich behandelt, so dass es sich erübrigt, hier näher darauf einzugehen; der Übersichtlichkeit halber sei das Verfahren nur kurz gestreift.

Die Zubereitung erfolgt im Walde oder in dessen nächster Nähe. Die ungeschälten Stämme müssen spätestens zehn Tage nach dem Fällen dieser Imprägnierung unterworfen, oder, wenn dies nicht möglich sein sollte, bis zu dieser Zeit unter Wasser aufbewahrt werden. Diese Massnahme hat den Zweck, dass die Saftbestandteile im Holze nicht vor der Imprägnierung mit Kupfervitriol verdicken, gerinnen oder in Gärung übergehen. In solchen Fällen würde die Wirkung der beabsichtigten Imprägnierung direkt in Frage gestellt, da die Anwendung dieses Verfahrens nur bei saftreichem Holze, also nur während der sogenannten Saftzeit des Holzes, möglich ist.

Die Durchsetzung der schrägliegenden Stämme mit der $1^1/_2$ prozentigen Kupfervitriollösung erfolgt, indem die Flüssigkeit aus einem etwa 10 m hoch gelagerten Bottich, also unter dem Überdruck von etwa einer Atmosphäre, vom Stammende nach dem Zopfende getrieben wird. Am Zopfende fliesst die Lösung, welche jetzt durch Holzsaft, Harz und koaguliertes Eiweiss verunreinigt ist, wieder aus und wird in Behältern aufgefangen. Das etwa noch in der Lösung befindliche Kupfer wird durch Eisenringe oder als Kupferhydroxyd durch Kalkmilch ausgefällt.

Die Imprägnierung dauert, je nach der Beschaffenheit des Holzes, etwa 8—14 Tage, und zwar nach der Statistik der Reichspost- und Telegraphenverwaltung 1889:

für eine 7 m lange Stange 10 Tage im Mittel,
„ „ 8·5 „ „ „ $11^1/_3$ „ „ „
„ „ 10 „ „ „ $13^1/_2$ „ „ „

Der Schutzwert der Imprägnierung erstreckt sich, wenn die Stangen langsam getrocknet werden, auf die Zeit von 12—15 Jahren. Um ein langsames Trocknen zu erreichen, bleiben die Stangen nach der Imprägnierung längere Zeit ungeschält liegen.

Um festzustellen, ob der Mast gut imprägniert ist, wird die Hirnfläche mit gelbem Blutlaugensalz bestrichen. An den vom Kupfervitriol durchsetzten Stellen bildet sich ein rotbrauner Niederschlag von Ferrocyankupfer.

In früheren Jahren wurden seitens der norwegischen Telegraphenverwaltung die Stangen dadurch imprägniert, dass ein 75 cm über dem Boden in dem lebenden Stamm angebrachtes Loch von 25 mm Durchmesser, welches nach innen starkes Gefälle besass, mit etwa 100—150 g zerstossenem Kupfersulfat angefüllt und durch einen Pflock verschlossen wurde. Nach etwa drei bis vier Monaten war das Sulfat absorbiert und wurde so oft erneuert, bis die ganze Stange durchdrungen war.

Die imprägnierende Wirkung des Kupfervitriols rührt daher, dass dasselbe mit den im Holze befindlichen Eiweissstoffen unlösliche Verbindungen eingeht, die jedoch durch Kalk und dessen Lösungen rasch zersetzt werden. Stangen, welche nach diesem Verfahren imprägniert sind, dürfen daher nicht in kalkhaltigen Boden gesetzt werden, da sie dann ungemein rasch verschleissen.

2. Imprägnierung mit Zinkchlorid.

Zinkchlorid wird durch Auflösen von Zink in Salzsäure hergestellt, kann aber auch fertig von chemischen Fabriken bezogen werden; es hat ein spezifisches Gewicht von 1·598 entsprechend 54° Beaumé und besteht aus beinahe gleichen Teilen Chlorzink und Wasser.

Die zur Imprägnierung verwendbare Chlorzinklösung darf keine freie Salzsäure enthalten und muss möglichst arm an Eisenverbindungen sein. Die höchste Beimischung von letzteren darf 0·1 % nicht übersteigen. Freie Salzsäure greift die Holzfaser an. Durch die Einwirkung von Eisen zersetzt sich die Zinkchloridlösung in Salzsäure und Zinkoxyd. GRITTNER-Budapest verlangt daher, dass Holz, welches mit Chlorzink imprägniert ist, mit Eisen nicht in Verbindung kommen soll.[1])

Zur Imprägnierung wird ein Teil der gesättigten Chlorzinklösung mit 20 Teilen Wasser verdünnt, so dass die Lösung 3° Beaumé zeigt.

Die Hölzer werden geschält, in einen entsprechend langen Kessel gebracht und dann der Einwirkung eines Wasserdampfes ausgesetzt, welcher nach einer halben Stunde die Temperatur im Kessel auf 100° C. gebracht hat. Bei dieser Temperatur erfolgt eine zweistündige Dämpfung.[2]) Nachdem durch einen Hahn am Boden des Kessels das Kondenswasser abgelassen worden ist, wird ein Vakuum von mindestens 520 mm Quecksilbersäule hergestellt, welches etwa $1^1/_2$ Stunden unterhalten wird.

Erst nach dieser Vorbereitung wird die Chlorzinklösung eingelassen und unter einen Druck von 7 Atmosphären gebracht. Nach einer einstündigen Einwirkung sind alle Poren von der Imprägnierungsflüssigkeit durchdrungen.

Kieferne Hölzer sollen auf einen Kubikmeter mindestens 300 kg Chlorzinklösung aufnehmen.

Die Stämme geben, namentlich bei trockener Witterung, einen grossen Teil der aufgenommenen Flüssigkeit durch Verdunstung wieder ab, wobei auch geringe Mengen von Chlorzink mitgenommen werden. Bei der leichten Löslichkeit des Mittels im Wasser wird ein weiterer Teil durch Regenwasser ausgelaugt, so dass die Maste nach und nach den durch die Imprägnierung erreichten Schutz gegen Fäule verlieren. Immerhin wird auch durch diese

1) Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung, 1897.
2) Näheres siehe S. 119 dieses Bandes.

Zubereitung bei Verwendung von Nadelhölzern eine Lebensdauer der Maste von 8—12 Jahren erreicht, dagegen sind andere Holzarten weniger widerstandsfähig, weil der Harzgehalt zu gering ist und die Auslaugung des Chlorzinks deshalb durch den Ein- und Austritt des Wassers beschleunigt wird.

Um die Güte dieser Imprägnierung zu prüfen, wird vom Mast eine Scheibe abgeschnitten und diese der Einwirkung von Schwefelammonium ausgesetzt, hierauf mit Essigsäure abgewaschen und mit einer sauren Lösung von salpetersaurem Bleioxyd bestrichen; hierdurch bildet sich Schwefelblei, welches die Flächen der Probescheibe schwarz färbt. Ist die Chlorzinklösung mit Eisensalzen verunreinigt, so werden die Flächen bei der Behandlung mit Schwefelammonium dunkelgrün.

3. Imprägnierung mit karbolsäurehaltigen Teerölen.

Die Zubereitung erfolgt fast ausschliesslich mit Teerölen, welche durch Destillation aus dem bei der Gasfabrikation gewonnenen Steinkohlenteer hergestellt werden, und zwar werden hauptsächlich die bei etwa 235° C. gewonnenen Destillate verwendet, welche Karbolöl in grösseren Mengen enthalten. Am geeignetsten jedoch wirken die bei 235—400° C. übergegangenen Destillate, schwere Öle, die dickflüssig und nicht flüchtig, infolge ihrer Verharzung in den Poren das Eindringen von Wasser unmöglich machen, wodurch den Fäulniserregern die wichtigste Lebensbedingung entzogen wird.

Im übrigen sei hier darauf hingewiesen, dass die meistverbreitete Ansicht, zur Tränkung würde kreosothaltiges Teeröl verwendet, eine irrige ist, Steinkohlenteer enthält, wie von Gorup Besaucz nachgewiesen wurde, überhaupt kein Kreosot. Der Irrtum beruht darauf, dass früher Kreosot, welches im Holzkohlenteer gefunden wird, mit Karbolsäure (Phenol) verwechselt wurde, zumal beide auch fast den gleichen Geruch besitzen.

Der Gehalt an Naphthalin, welches in den Teerölen auch in reichlichen Mengen vorkommt, soll möglichst gering sein, da dasselbe die Poren verstopft und so die Aufnahmefähigkeit des Holzes für die Tränkungsflüssigkeit wesentlich beeinträchtigt, trotzdem es an und für sich fäulnishindernd wirkt.

Im übrigen dringen diese Teeröle kaum mehr als einige Centimeter in das Holz ein, Kiefernholz nimmt es fast nur im Splint auf.

Im grossen und ganzen ist das Verfahren bei der Imprägnierung dem vorher beschriebenen nahezu gleich, nur werden die Maste nicht dem Wasserdampf ausgesetzt, sondern in auf 100° C. erhitzter Luft 8—10 Stunden getrocknet.

Unangenehm bemerkbar machen sich die mit Teeröl durchtränkten Maste, wenn dieselben an bewohnten Orten, Strassenübergängen u. s. w. aufgestellt sind. Der durchdringende Geruch hält sehr lange an, in der Sonne wird das Teeröl weich, auch wenn es schon lange Zeit zum Trocknen hatte, und tritt an den Masten heraus. Die Folge davon ist ein Herunterlaufen an den Aussenseiten der Stangen; ferner wirken die karbolsäurehaltigen Bestandteile im Teeröl schädlich auf die Augen der an den Stangen beschäftigten Arbeiter. Am zweckmässigsten wird das Teeröl, trotzdem es ja an und für sich einer der besten Imprägnierungsstoffe ist, nur dort zur Anwendung gebracht, wo die angeführten Übelstände nicht so

zu Tage treten können, z. B. bei Brückenhölzern, Eisenbahnschwellen u. s. w., oder bei Leitungsmasten an solchen Stellen, wo Menschen selten hinkommen. Ein Anstreichen der Stangen, welche mit Teeröl getränkt sind, mit Ölfarbe ist völlig ausgeschlossen. — Derart imprägnierte Stangen haben eine Lebensdauer von etwa 15, und wenn die Beschaffenheit des Holzes an und für sich sehr gut war, sogar bis zu 20 Jahren.

4. Imprägnierung mit Quecksilbersublimat, sogenannte Kyanisierung.

Nach dem Erfinder KYAN wird ein Verfahren benannt, durch welches die fäulniswidrigen Eigenschaften von Quecksilbersublimat ausgenutzt werden, um eine gute Konservierung des Holzes zu erreichen.

Dieses Verfahren[1]) beruht hauptsächlich auf Bildung unlöslicher Verbindungen des Metallsalzes mit den Eiweissbestandteilen des Holzsaftes. Es genügt schon die blosse Einlaugung geringer Mengen des Sublimates in das Holz, um einen wirklichen Schutz gegen Fäulnis zu gewähren, da dieses Mittel ausserordentlich fäulnishindernde Wirkungen ausübt. Auch dürfte die Anwendung dieses Verfahrens das einfachste sein, da alle anderen Mittel mehr oder weniger Hinzuziehung besonderer Kräfte, maschineller Einrichtungen u. s. w. erfordern.

Um zu prüfen, ob Holz mit Sublimat behandelt ist — das Aussehen wird dadurch nicht verändert —, bestreicht man es mit Schwefelammonium, wodurch beim Zusammentreten mit Sublimat eine dunklere Färbung der bestrichenen Stelle hervorgerufen wird. Wird der Querschnitt des durchtränkten Mastes auf diese beschriebene Weise untersucht, so wird nur auf einem verhältnismässig schmalen Ringe, von der Aussenfläche an, eine dunklere Färbung erscheinen, während das Innere unverändert bleibt.

Das Holz, welches für die Kyanisierung in Frage kommt, soll nur im Winter, also ausserhalb der Saftzeit („Wadel") gefällt, gut ausgetrocknet und sauber entrindet sein. Durch gehörige Austrocknung der Hölzer, zweckmässige Aufstapelung und unbehinderten Luftzutritt werden die Maste für die Aufnahme der Imprägnierungsflüssigkeit ganz besonders fähig, zumal sich infolge des Trocknens sogenannte Luftrisse bilden, welche das Holz mehr freilegen.

Ein Anstrich der kyanisierten Stangen ist ohne weiteres möglich.

Nach amtlichen Ermittelungen soll die durchschnittliche Lebensdauer der nach KYANschem Verfahren behandelten Leitungsstangen ca. $17^1/_2$ Jahre betragen. Die Imprägnierung mit Sublimat würde jedenfalls bedeutend günstigere Resultate zeitigen, wenn sie in geschlossenen Gefässen unter Druck erfolgen könnte, nachdem die Hölzer vorher gedämpft und dann die Luft aus den Behältern evakuiert worden wäre. Dies ist aber nicht möglich, da das Sublimat die zur Verwendung kommenden Metalle bald zerstören würde.

Ausserdem können nur dünne Lösungen verarbeitet werden, da das Sublimat eines der schärfsten Gifte und infolgedessen das Arbeiten mit den für das Verfahren erforderlichen grossen Mengen wenig angenehm ist.

---

1) Nach Angaben von GEBR. HIMMELSBACH, Freiburg i. B.

5. Imprägnierung mit Zinkchlorid und karbolsäurehaltigem Teeröl (Verfahren nach Rütgers).

Von J. Rütgers, dessen Name mit den Erfolgen auf dem Gebiete der Holzimprägnierung innig verbunden ist, wurde schon im Anfange des Jahres 1872 der Vorschlag gemacht, die Hölzer nicht nur mit Chlorzinklösungen zu tränken, sondern diesen Lösungen noch karbolsäurehaltiges Teeröl zuzusetzen. Nach diesem Verfahren, welches auf den Rütgersschen Werken zu hoher Vollkommenheit ausgebildet ist, werden die meisten Stangen der preussischen Staatsbahnen imprägniert.

Das Teeröl löst sich in der Chlorzinklösung und dringt in dieser Verdünnung viel leichter in alle Poren ein als das schwere Teeröl. Da die Mischung auf die harzigen Bestandteile des Holzes lösend wirkt, so erfolgt das Eindringen der Flüssigkeit viel leichter, dieselbe dringt tiefer ein.

Die Tränkung zerfällt in drei Teile:[1])

1. das Dämpfen des Holzes,
2. die Herstellung der Luftverdünnung und das Einlassen der Tränkungsflüssigkeit,
3. die Anwendung der Druckpumpe.

Das in dem luftdicht verschlossenen Tränkungskessel befindliche Holz wird zuerst durch Dampf erhitzt. Die Dauer des Erhitzens ist von der Jahreszeit und der Beschaffenheit des Holzes abhängig. Der einströmende Dampf soll das Holz möglichst aufnahmefähig machen, es reinigen und den hauptsächlich an den Stirnseiten festsitzenden, mit Sand und Staub vermengten Pflanzenschleim aufweichen und entfernen.

Die Dampfzuströmung wird so geleitet, dass der mit dem Tränkungskessel verbundene Druckmesser nach mindestens 30 Minuten eine Spannung von $1^1/_2$ Atmosphären Überdruck anzeigt. Dieser Dampfspannung bleibt das Holz weitere 30 Minuten ausgesetzt.

Bei etwa vorkommendem frischem Holze, welches voraussichtlich die vorschriftsmässige Aufnahme an Tränkungsflüssigkeit nicht erreicht, wird die Einwirkung des Dampfes derartig verlängert, dass die Spannung von $1^1/_2$ Atmosphären 60 Minuten lang erhalten bleibt.

Obige Vorschrift gilt für Eichen- und Kiefernholz. Da Buchenholz grössere Mengen eines sehr leicht in Gärung übergehenden Holzsaftes enthält, so muss die Einwirkung des Dampfes so lange fortgesetzt werden, bis der Holzsaft im innersten Kern den Siedepunkt erreicht hat.

Das Buchenholz, gleichgültig ob es trocken oder frisch ist, wird zur Erreichung dieses Zweckes vier Stunden lang der Einwirkung des Dampfes ausgesetzt, wobei die 30 Minuten, welche zur Herstellung der Spannung von $1^1/_2$ Atmosphären erforderlich sind, mit eingerechnet werden.

Nachdem das Holz genügend lange Zeit mit Dampf behandelt worden ist, wird derselbe aus dem Tränkungskessel abgelassen und nunmehr in demselben eine Luftverdünnung von mindestens 60 cm Quecksilberstand am Vakuummeter erzeugt, welche 10 Minuten lang erhalten werden soll.

---

1) Nach Angabe der Rütgers-Werke, A.-G., Berlin.

Danach beginnt ohne Verminderung der Luftverdünnung die Füllung des Tränkungskessels mit der Tränkungsflüssigkeit, welche vorher auf mindestens 65 ^{0} C. erhitzt worden ist.

Nach erfolgter Füllung wird die Tränkungsflüssigkeit mittels Pumpen in das Holz gedrückt und der Druck auf mindestens 7 Atmosphären Überdruck gesteigert.

Um die Sättigung des Holzes möglichst vollkommen zu erreichen, soll dieser Druck bei Kiefern- und Buchenholz wenigstens 30 Minuten, bei Eichenholz aber 60 Minuten erhalten bleiben; nach Bedürfnis muss diese Zeit verlängert werden, bis die vorschriftsmässige Aufnahme an Tränkungsflüssigkeit erreicht ist.

Die zur Tränkung benutzte Chlorzinklösung muss ebenso rein sein wie die bei dem zu zweit angeführten Verfahren, jedoch verlangt RÜTGERS, dass sie eine Stärke von 3·5 ^{0} Bé = 1·0244 spez. Gewicht bei 15 ^{0} C. habe. Der Gehalt dieser Lösung an metallischem Zink beträgt 1·26 Hundertteile.

Das zuzusetzende Teeröl darf höchstens 1 Hundertteil unter 125 ^{0} C. siedendes Öl enthalten. Es muss so schwerflüchtig sein, dass der Siedepunkt hauptsächlich zwischen 350 bis 400 ^{0} C. liegt; es dürfen sich keineswegs mehr als 25 Hundertteile unter 235 ^{0} C. verflüchtigen. Der Gehalt an sauren, in Natronlauge von 1·15 spez. Gewicht löslichen Bestandteilen (karbolsäureartigen Stoffen) muss mindestens 10 Hundertteile betragen.

Das Teeröl muss bei — 20 ^{0} C. vollständig flüssig und möglichst frei von Naphthalin sein. Das spez. Gewicht soll bei — 15 ^{0} C. zwischen 1·03 bis 1·10 betragen.

Das Teeröl wird während der Erwärmung der Chlorzinklösung zugesetzt.

Um eine möglichst vollkommene Mischung beider Substanzen zu erreichen, muss eine gute Mischvorrichtung unter Zuströmung von Dampf und Luft angewendet werden.

Es wird von RÜTGERS gewährleistet, dass die durchschnittliche, für jede Kesselfüllung in Betracht zu ziehende Aufnahme an Chlorzinklösung einschliesslich des Zusatzteeröles beträgt:

für 1 cbm Kiefern- oder Buchenholz in verschiedenen Abmessungen 310 bezw. 325 kg und für die gleiche Menge Eichenholz 100 kg.

Diese gewährleistete Aufnahme setzt voraus, dass das Holz gesund und im Wadel gefällt, ausserdem derartig trocken ist, dass der Kubikmeter Kiefernholz nicht über 630, Buchenholz nicht über 725 und Eichenholz nicht über 800 kg wiegt.

Wenn wegen ungenügender Trockenheit oder besonders kerniger Beschaffenheit des Holzes die gewährleistete Aufnahme an Tränkungsflüssigkeit nicht erreicht werden kann, so soll die Chlorzinklösung entsprechend verstärkt werden.

Zur Feststellung der von dem Holze bei dem eben beschriebenen Tränkungsverfahren aufgenommenen Menge Chlorzinklösung wird das Holz zunächst vor dem Einfahren in die Tränkungskessel und zum zweiten Male nach geschehener Tränkung, und zwar beim Ausziehen aus den Tränkungskesseln vermittels Brückenwage gewogen. Der Gewichtsunterschied ergiebt die aufgenommene Menge Tränkungsflüssigkeit.

Das Holz wird bei dieser Tränkung wirksamer gegen Fäulnis geschützt als durch die Tränkung mit reiner Chlorzinklösung. Das Teeröl dringt aller-

dings nicht weit von den Enden in das Holz ein, so dass die Tränkung nur chemisch nachweisbar ist und beim Zerschneiden des Holzes dem Auge nicht sichtbar wird, weil eben nur die klare, wasserhelle Chlorzinklösung, welche eine Veränderung des Holzes nicht hervorbringt, das Holz von einem bis zum anderen Ende durchdringt. Die fäulniswidrige Wirkung des Chlorzinks genügt aber völlig zum Konservieren des Holzes im Innern, denn der Teerölzusatz, welcher in alle kleinen Risse eindringt und das Holz von aussen mit einem Mantel umzieht, verhindert durch seinen öligen Charakter das Eindringen von Feuchtigkeit in das Holz und das Auslaugen der in die Holzmasse eingedrungenen Chlorzinklösung.

Bei diesem Verfahren ist also eine vorherige Trocknung im Trockenofen nicht erforderlich, der Imprägnierungsprozess verlängert sich bei feuchtem Holz nur um einige Zeit. Es ist sogar nicht einmal die vorherige Trocknung an der Luft nötig.

Nach diesem Verfahren imprägnierte Masten sind z. B. in den Jahren 1870 bis 1875 als Telegraphenstangen auf der Strecke Berlin—Frankfurt a/O. verwendet worden, und zwar 7716 Stück kieferne Stangen von 7 bis 10 m Länge.

In den Jahren 1895 und 1896 wurde das Gestänge nur deshalb ausgewechselt, weil längere Stangen erforderlich wurden; auch auf anderen Strecken sind derart imprägnierte Stangen nur anlässlich örtlicher Veränderungen (Traceverlegungen, Kabelstrecken u. s. w.) zur Auswechselung gelangt.

Von der Gesamtzahl von 7716 Stangen sind in 25 bis 30 Jahren im ganzen wegen Unbrauchbarkeit durch Fäulnis nach den statistischen Angaben der Königlichen Eisenbahndirektion Berlin jedoch nur 191 Stangen, also annähernd 2·5 %, entfernt worden.

6. Imprägnierung nach dem System Hasselmann[1]) (D. R.-P. 134178).

Bei den früher beschriebenen Verfahren war der leitende Gesichtspunkt, die Intercellularräume im Holz mit irgend einem antiseptischen Mittel anzufüllen oder sie mit Stoffen zu tränken, die den Zutritt von Feuchtigkeit und somit von Fäulniserregern verhindern oder doch erschweren. Die Holzfaser wurde gewissermassen mit einer Schutzhülle umgeben. Bei dem Verfahren nach Hasselmann wird von diesem Wege abgewichen, die Intercellularräume bleiben hohl und es wird zwischen dem zur Verwendung kommenden Imprägnierungsmittel und der Holzfaser eine chemische Verbindung hergestellt, die im Wasser unlöslich ist und infolgedessen kann auch keine allmähliche Auslaugung des Schutzmittels, wie bei einigen anderen Verfahren, stattfinden.

Für die Imprägnierung werden die Lösungen schwerer Metalloxyde verwendet, denen gegenüber sich die Holzfaser als durchlässig erweist, während sie Wasser nicht durchlässt. Infolgedessen findet bei gleichzeitiger Anwendung von Wärme eine völlige Durchdringung der Zellenwände statt.

Im wesentlichen werden Eisen- und Kupfervitriol in Form von Adlervitriol neben schwefelsaurer Thonerde verwendet. Würden nur die einzelnen

1) Zu bemerken ist, dass dieses System vielfach angegriffen wird; es wird seine Lebensfähigkeit noch zu beweisen haben.

Salze Verwendung finden, so würde sich im eisernen Tränkungskessel das Kupfer ausfällen und die Wandungen angreifen. Diesen Doppelsalzen werden je nach den Umständen Kalium- und Kalciumverbindungen zugesetzt, welche für sich allein die Zellenwandungen nicht durchdringen können, in Verbindung mit metallischen Lösungen aber von denselben durchgelassen werden.

Statt des Eisenvitriols könnte auch Quecksilbersublimat verwendet werden, wenn nicht der hohe Preis die Verwendung ausschlösse. Billige Oxydule schwerer Metalle, welche in grossen Mengen zu haben wären, auch zugleich dauerhaft sind und antiseptisch wirken, existieren ausser dem Eisenvitriol augenblicklich nicht.

Vor der Ausführung des chemischen Verfahrens werden die Hölzer auch hier einer längeren Dämpfung ausgesetzt und dann ein Vakuum hergestellt. Hierauf wird die erwärmte Imprägnierungsmasse eingelassen und durch Dampfzuführung allmählich auf eine Atmosphäre Überdruck gebracht. Für 1 cbm Holz sind etwa erforderlich

ca. 2·5 kg Eisenvitriol
„ 2·0 „ schwefelsaure Thonerde
„ 1·0 „ Kupfervitriol
„ 1·5 „ Kainit oder Sylvinit, event. Chlorkalcium, je nach den Umständen.

Um festzustellen, dass die Imprägnierung gut ausgeführt ist, befeuchtet man ein Stück des imprägnierten Holzes mit einer Lösung von Blutlaugensalz. Zunächst zeigt sich keine Färbung, weil die Chemikalien mit dem Holze chemisch verbunden sind. Sowie sie aber durch Befeuchten mit Salzsäure aus der Verbindung gelöst sind, färbt sich die Fläche blau, weil das freigewordene Eisenvitriol mit Blutlaugensalz das Pariser Blau liefert.

Die in der Fig. 130 wiedergegebenen Photographien zeigen Hölzer vor und nach der Imprägnierung, sowie den Einfluss der Feuchtigkeit, wenn sie überhaupt nicht imprägniert sind.

78. Imprägnierung im elektrochemischen Bade.

Ein neues Verfahren zum Imprägnieren von Masten[1]) besteht darin, dass sie in einen Bottich gelegt werden, der mit zwei Bleielektroden ausgerüstet ist. Das Gefäss wird mit einer Harzlösung, Borax und Natriumkarbonat, angefüllt und an die beiden Elektroden, zwischen denen die Maste liegen, an eine Stromquelle angeschlossen, welche mit 110 Volt Spannung arbeitet. Unter dem Einfluss des Stromes soll der Holzsaft ausscheiden und an seine Stelle die Imprägnierstoffe treten. Der Prozess dauert 5 bis 8 Stunden, wobei die Temperatur der Flüssigkeit auf 50° C. steigt.

79. Anstrich der Maste.

Das Anstreichen der Maste mit Ölfarbe und ähnlichen Mitteln ist nicht vorteilhaft, wenn auch häufig nicht zu umgehen; es kann sogar, wenn z. B. nicht genügend ausgetrocknetes Holz verwendet wird, direkt schädlich wirken. Die in dem Holze vorhandene Feuchtigkeit hat durch die infolge des Anstrichs gebildete undurchdringliche Decke keinen Abzug, so dass eine Fäulnis eher eintritt, als wenn ganz ohne den Anstrich die Luft ungehinderten Einlass gehabt hätte. Aber auch bei trocknem Holze verliert die Anstrichdecke den Halt und bröckelt ab, da sie der Luft, dem Lichte und Regen ausgesetzt ist.

80. Untersuchung der Maste.

Die hölzernen Stangen sind jeweils im Frühjahr und Herbst jeden Jahres in Bezug auf Beschaffenheit des Holzes, den senkrechten Stand, auf Ver-

1) El. Rev. New York, Bd. XL, S. 733.

irkungsmittel u. s. w. zu untersuchen. Die Beschaffenheit des Holzes[1]) wird ırch Beklopfen der Stangen mit einem harten Gegenstand in der Höhe von 5 bis 2·0 m über dem Erdboden geprüft. Ein heller Ton lässt auf gesundes

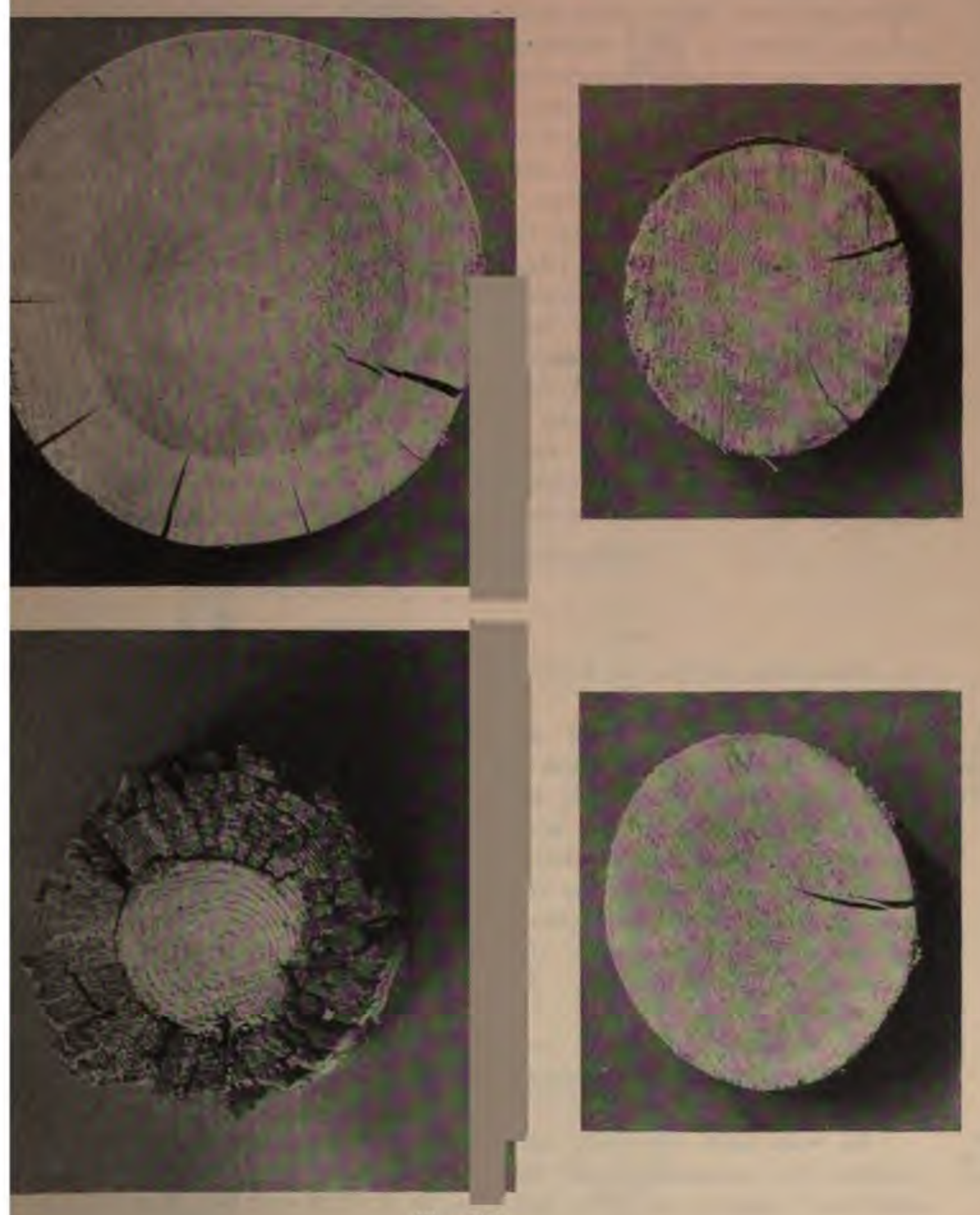


Fig. 130.

lz schliessen, ein dumpfer Ton dagegen giebt zu erkennen, dass eine nauere Untersuchung der Stangen vorzunehmen ist, die wie folgt ausgeführt rden kann.

1) Nach einer Arbeit des Elektrotechnischen Vereins, München.

Im Laufe der ersten zehn Jahre wird in jedem zweiten Herbst eine genauere Prüfung der Leitungsmaste vorgenommen. Nach Verlauf dieser Zeit müssen die Stangen mindestens in jedem Herbst revidiert werden.

Zu diesem Zweck sind dieselben bis auf 20 oder 25 cm durch Aufgraben freizulegen und mittels eines geeigneten spitzen Instrumentes (Stichel, feststehendes Messer u. s. w.) anzustossen, so dass man an dem Widerstande, den das Holz dem Stosse entgegensetzt, erkennen kann, ob es weich ist oder nicht.

Wenn Stangen zwar äusserlich gesundes Holz zeigen, aber beim Beklopfen einen dumpfen Ton geben, ist auf Kernfäule zu schliessen; dann ist das Innere mittels eines ca. 5 mm starken Bohrers zu prüfen und das Bohrmehl zu untersuchen. Hat man keinen Anlass zu Bedenken, so wird man das Bohrloch mit einem harten Holzstift wieder schliessen.

Bei Stangen bis zu einer Länge von 11 m ist das Untersuchen des Holzes, wenn der Mast weder verstrebt noch verankert ist, einfacher. Man muss eine Stützgabel an das obere Ende im rechten Winkel seitlich zur Leitungsrichtung spreizen und die Stange in mässige Schwingungen versetzen. Faule Stangen werden dann dicht über dem Erdboden ein leises, krachendes bezw. knisterndes Geräusch von sich geben.

Um die Untersuchung zu erleichtern, empfiehlt es sich, in die Maste das Datum ihrer Einsetzung einzubrennen. Durch eingebrannte Buchstaben wird ferner die Art der Imprägnierung bezeichnet, und zwar bedeuten

C Imprägnierung mit Kupfervitriol
Q „ „ Quecksilberchlorid
K „ „ Teerölen.

Ausserdem werden die Maste in Fernleitungen auch noch mit fortlaufenden Nummern versehen.[1])

81. Schutzmittel bei rohen Stangen. In vielen Gegenden wird man des kostspieligen Transportes wegen imprägnierte Maste nicht beziehen und hauptsächlich dann nicht, wenn in unmittelbarer Nähe Wälder sind, denen gutes und billiges Stangenmaterial entnommen werden kann. Man wird aber auch in solchen Fällen einen Schutz anstreben, hauptsächlich an den Stellen, an denen die Maste am meisten gefährdet sind. Man pflegt sie zum wenigsten an dem Teile, welcher in die Erde hineinragt und am Zopfende mit Karbolineum (Avenarius-Patent) satt anzustreichen.[2]) Es empfiehlt sich, diesen Anstrich im Laufe der Jahre hin und wieder zu wiederholen. Für etwa 4 bis 6 qm Fläche ist 1 kg erforderlich.

Ein weiteres Mittel, um den in der Erde steckenden Teil zu schützen, besteht darin, dass man diesen Teil ankohlt und dann mit Steinkohlenteer anstreicht.

82. Schutzschäfte. Es wird auch versucht, durch die Anbringung von besonderen Schutzschäften die Lebensdauer der Maste zu erhöhen. Von diesen Schutzmitteln sind zwei bekannt, und zwar das eine, D. R.-P. No. 72880, Anbringung von Faltenpappe,[3]) (Fig. 131) und ferner Schutz durch Eisen (Fig. 132).

Die in die Erde reichenden Stämme werden mit Faltenpappe umnagelt (Fig. 131 b) und die Hohlräume mit antiseptischen Stoffen ausgegossen.

---

1) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 32.
2) ETZ 92, Heft 22.
3) ETZ 94, Heft 4, auch Kalender von Uppenborn, 1905.

rbei wird insbesondere auch die Anwendung von Weisskalk empfohlen, cher in hohem Grade geeignet sein soll, das Holz zu konservieren. Der r die Erde reichende Teil der Pappe soll zum Schutz gegen direkte Be-

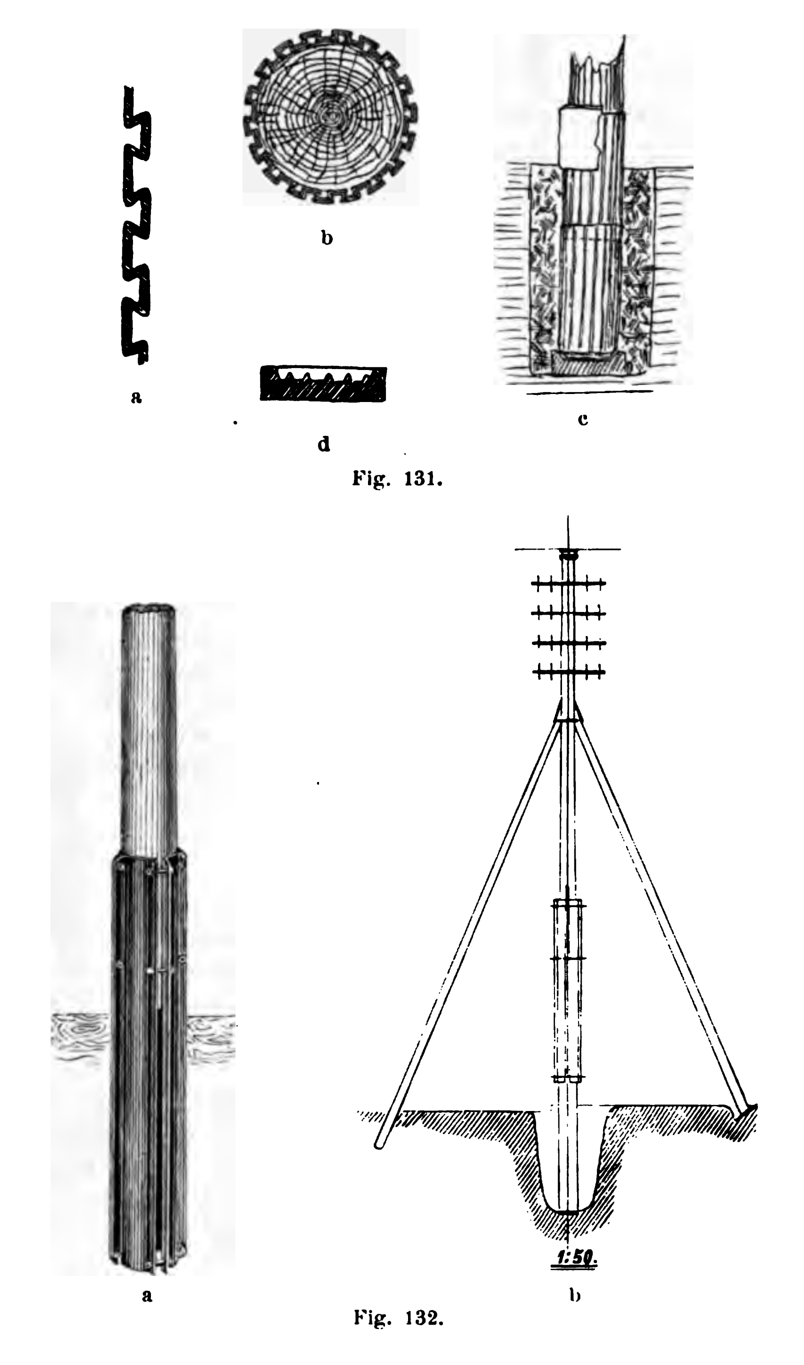


Fig. 131.

Fig. 132.

ädigung mit einem Cementverputz[1]) versehen werden. Um der Stange

1) Neuerdings werden von BOURGEAT Cementmaste mit Holzeinlage vorgeschlagen; e Schweizerische Elektrotechnische Zeitschrift 1905, S. 89.

einen festen Halt zu geben, soll dieselbe auf einen etwa 28 cm grossen, 8 bis 10 cm starken Formstein gestellt werden (Fig. 122 c—d), welcher vorher mit Imprägnierstoff angefüllt werden kann. Die Kosten für dieses Verfahren werden angegeben wie folgt:

an Pappe 1·07 qm	Mk. 1·07
an Kalkmilch zum Einguss inkl. Verlust durch Verschütten rund 4 l . . .	„ 0·03
an Pappnägeln	„ 0·03
1 Formziegel	„ 0·10
1 Cementsockel kompl. 30 cm hoch, 5 cm unter Erde reichend, $3^1/_2$ cm stark	„ 0·20
	Mk. 1·43

Bei dem zweiten Verfahren [1]) ist man bestrebt, durch die Anbringung von Eisenkonstruktionen dem Maste die durch Fäule verloren gegangene Widerstandsfähigkeit wiederzugeben. Entweder wird das faule Ende abgeschnitten und durch den Eisenschaft (Fig. 132 a) ersetzt, oder der angegriffene Teil wird gesäubert und der Schaft übergezogen. Diese Art der Verstärkung wird hauptsächlich dann von Vorteil sein, wenn es sich um Gestänge handelt, welche sich im Betrieb befinden und bei denen eine Auswechselung der Maste grosse Schwierigkeiten bereiten würde. Die Art dieser Auswechselung ist aus Fig. 132 b leicht erkennbar. Der Mast wird durch die seitlichen Streben provisorisch verankert, das Erdreich wird aufgegraben und dann der Schutzschaft übergeschoben.

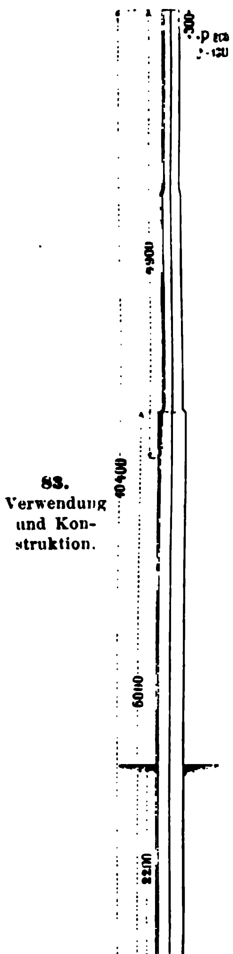


Fig. 133.

Eisenmaste.

83. Verwendung und Konstruktion.

In den Fällen, in denen die Beanspruchung der Maste besonders gross ist, wenn auf bessere Ausstattung der Freileitung Gewicht gelegt wird, werden eiserne Maste verwendet.

Es werden Rohrmaste oder Gittermaste gewählt. Die ersteren sind zum Teil Mannesmannrohre, zum Teil mit besonderen seitlichen Rippen gewalzte Rohre. Gittermaste werden aus Flach-, Winkel und U-Eisen zusammengesetzt. Die Berechnung eines derartigen Mastes findet sich auf S. 138.

In Fig. 133 ist ein Mannesmann-Rohrmast dargestellt. Die Abmessungen und zulässigen Belastungen für diese sind in Tabelle No. 1 S. 129 wiedergegeben.

Um diese Maste in Gegenden aufstellen zu können, in denen aus Schönheitsrücksichten der nackte Mast nicht verwendet werden kann, sind besondere Zierköpfe, -Ringe und -Sockel anzuwenden, die in Fig. 125 abgebildet sind.

1) D. R.-G.-M. 141 026, ausgeführt von GEBR. STEUER, Dresden.

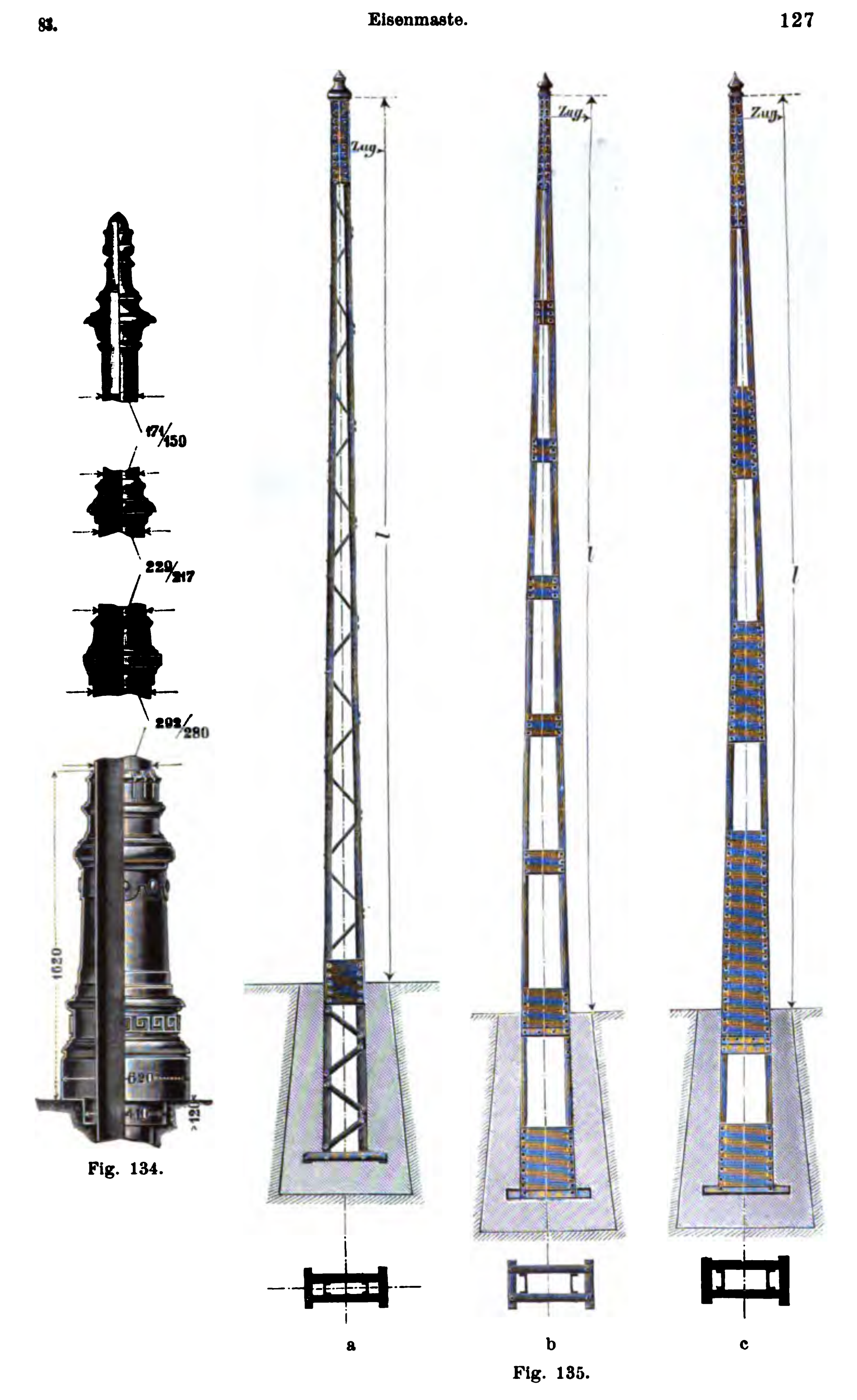


Fig. 134.

Fig. 135.



Fig. 136.



Fig. 137.

Tabelle No. 1.

Gewichte und Dimensionen von Mannesmann-Rohrmasten.

Masse des Abschnittes						Gesamt-länge in	P. - horizontaler Zug in	δ - zulässige Durch-biegung in	Gewicht
oben		Mitte		unten					
innen	aussen	innen	aussen	innen	aussen	mm	kg	mm	ca. kg
98	108	130	140	161	171	8200	150	100	145
111	121	142	152	181	191	8200	225	100	180
130	140	168	178	206	216	8400	350	100	235
130	140	168	178	206	216	9200	225	120	230
141	152	192	203	243	254	8600	550	100	290
141	152	192	203	243	254	9400	550	120	350
159	171	217	229	280	292	9600	800	120	450
159	171	217	229	280	292	10400	800	130	575

Gittermaste können in mannigfachen Formen ausgeführt werden, von denen die gebräuchlichsten hier erwähnt sind:

1. hergestellt aus zwei [-Eisen und Flacheisen-Diagonalen (Fig. 135 a),
2. hergestellt aus zwei [-Eisen mit kurzen Blechverbindungen (Fig. 135 b) oder mit langen Blechverbindungen (Fig. 135 c),
3. hergestellt aus vier Winkeleisen und Flacheisen-Diagonalen (Fig. 136) oder eventuell solchen aus Winkeleisen.

Aus der nachstehenden Tabelle No. 2 (nach Angaben der Aktiengesellschaft Lauchhammer) können die Gewichte und zulässigen Beanspruchungen dieser Maste entnommen werden. Nach dem Gewicht derselben kann der Preis einigermassen genau geschätzt werden.

Fig. 136 zeigt einen Mast, wie er von Schuckert in der Centrale Stuttgart verwendet wurde und Fig. 137 einen Verteilungsmast der Centrale Sigmaringen.

Stangen in den Tropenländern.

84. Stangen in den Tropen.

Der Export der deutschen Elektrotechnik nach Tropenländern ist ein ganz gewaltiger und die Frage, was für Leitungsträger für die oft sehr langen Übertragungen verwendet werden sollen, eine ungemein wichtige. Es treten beim Leitungsbau in den Tropen ungemein viele Schwierigkeiten auf, so dass es wünschenswert erscheint, etwas näher hierauf einzugehen.

Bei dem Bau der 252·6 km langen Telegraphenleitung Kilwa-Lindi-Mikidani in Deutsch-Ostafrika sind für das Gestänge einteilige Mannesmannröhren aus Siemens-Martin-Stahl von 6·5 m Länge und in salzigem Boden versuchsweise Stangen aus Boritiholz verwendet worden.

Mit Bezug darauf scheint das Gutachten des Ingenieurs Herrn R. von Fischer, Treuenfeld, welcher als Telegraphenbaudirektor der Firma Siemens Brothers & Co., Ltd., London, reiche Erfahrungen im Bau tropischer Telegraphenleitungen hat, sehr bemerkenswert.

Danach bewähren sich seit circa 35 Jahren die zweiteiligen eisernen Gestänge, und zwar aus Gussrohr für den Erdboden und Stahlrohr für den oberen Stangenteil in den Tropen ganz besonders gut. Dagegen dürfte dies von einteiligen Stahlrohren weniger zu erwarten sein, da in der sogenannten Grundlinie Feuchtigkeit mit Trockenheit anhaltend wechseln und von der Hitze begünstigt ein lebhaftes Rosten und Durchfressen der Stangen wohl leicht erwartet werden kann. Bei Stangen mit gusseisernen Grundrohren dürften aber diese Missstände weniger leicht auftreten, zumal an Millionen derartiger von Siemens Brothers & Co. verwendeter Stangen jahrzehntelang wesentliche Beschädigungen nicht entstanden sind. Es wird auch von den Engländern mit ihrem ausgedehnten Betrieb in den Tropen ganz allgemein nur zweiteiliges Gestänge verwendet.

Auch die versuchsweise Anwendung von Stangen aus Boritiholz in salzhaltigem Boden scheint bedenklich! Es ist unmöglich, in Urwäldern, in denen der Weg mühsam gebaut werden und der Bau rastlos fortschreiten muss, erst zu untersuchen, ob Eisen- oder Holzmaste aufgestellt werden können. Der Bauunternehmer müsste ja immer erst eine chemische Analyse auf Salzgehalt vornehmen, bevor eine Stange aufgestellt wird. Abgesehen davon, dass das Arbeiten mit zweierlei Material bei entlegenen Fernstrecken

Tabelle No. 2.

Gewichte und zulässige Beanspruchung von Gittermasten.

Länge über Boden m	Gesamtlänge inkl. Bodenbefestigung m	Zug kg	Gewichte in kg der Maste nach Fig. 135a	Fig. 135b	Fig. 135c	Fig. 136
6	7·5	100	166	183	184	168
		200	169	184	185	174
		300	172	185	186	198
		400	177	187	188	227
		600	242	255	245	288
		800	293	285	273	367
		1000	377	384	360	431
7	8·5	100	186	208	217	191
		200	197	210	219	198
		300	200	211	220	239
		400	231	241	251	267
		600	320	323	322	349
		800	375	385	368	453
		1000	429	436	419	562
8	9·6	100	213	229	239	215
		200	218	231	241	247
		300	221	233	243	277
		400	265	268	277	332
		600	360	362	357	411
		800	425	431	410	499
		1000	550	566	529	644
9	10·7	100	270	289	303	240
		200	276	291	305	277
		300	281	293	307	335
		400	292	295	309	351
		600	398	401	398	454
		800	534	540	520	573
		1000	612	627	591	697
10	11·8	100	294	317	338	272
		200	300	319	340	327
		300	305	321	342	368
		400	310	307	327	401
		600	438	442	444	524
		800	583	594	578	685
		1000	691	692	657	839
11	12·9	100	369	406	419	300
		200	377	410	424	367
		300	383	413	426	400
		400	390	396	410	454
		600	545	563	556	606
		800	639	639	632	855
		1000	848	836	808	932
12	14	100	434	442	490	341
		200	441	445	493	414
		300	453	430	481	481
		400	457	514	530	540
		600	608	610	606	680
		800	789	804	780	892
		1000	910	910	880	1043

Materialbeanspruchung: 1200 kg.

lästig ist, können, zumal bei dem schwierigen Transport, nicht zu unterschätzende Kosten und Verwirrungen verursacht und die richtige Verteilung der Stangen in Frage gestellt werden.

Berechnung der Leitungsmaste, Durchhang der Leitungen.[1])

58. Belastung der Maste und Leitungen.

Führt die Freileitung in gerader Linie, so findet bei ruhiger Luft eine Beanspruchung der Maste auf Biegung nicht statt, wenn die nach zwei Seiten abgehenden Drähte nahezu gleich gespannt sind. Das gleiche gilt, wenn von einem Verteilungspunkt nach allen möglichen Seiten Leitungen abzweigen, der resultierende Leitungszug aber mehr oder weniger nahe an Null liegt. Es findet hierbei nur eine senkrechte Belastung der Maste durch das Eigengewicht der Leitung und eines etwaigen Eisbelages statt. Die in Frage kommenden Gewichte der Leitungen können aus den Tabellen No. 7 bis 14, Hdb. VI, 1, S. 12 u. ff. entnommen werden.

Die Eisbelastung kann unter Umständen sehr bedeutend sein. Herzog & Feldmann berichten,[2]) dass im Winter 1879 ein Eisendraht von 4 mm Durchmesser durch Eisbildung einen Durchmesser von 38 mm angenommen habe.

Die Beanspruchung der Gestänge durch die senkrecht wirkende Belastung wird durch die Formel[3]) für Knickbelastung eines Stabes gegeben, dessen eines Ende eingespannt, dessen anderes frei ist.

$$P_k = \frac{\pi^2 E J}{4 L^2}.$$

Hierin bedeuten für unseren Fall:

L = die Länge des Mastes zwischen dem Fusspunkt und dem arithmetischen Mittel aus den Angriffspunkten der Leitungen;

E = den Elastizitätsmodul[4]) des Stoffes in kg/cm²;

2 000 000 kg/cm²	für Schweisseisen in der Sehnenrichtung;	
750 000 — 1 050 000 kg/cm²	für Gusseisen;	
96 000 kg/cm²	für Kiefernholz, Feuchtigkeitsgehalt	18 %;
99 000 „	„ Fichte „	19 %;
103 000 „	„ Eiche;	
169 000 „	„ Buche;	

J = das kleinste äquatoriale Trägheitsmoment des am Fusspunkt gelegenen gefährlichen Mastquerschnittes. Dasselbe ist für den kreisförmigen Querschnitt[5]) einer Stange

$$J = 0{\cdot}049\, D^4$$

und für den ringförmigen Querschnitt

$$J = 0{\cdot}049\, (D^4 - d^4).$$

Bezüglich der zulässigen Belastung siehe S. 138.

1) Vgl. Hdb. XII, S. 698 f.; Zeitschrift für Elektrotechnik 1900, Heft 41.

2) Herzog & Feldmann, Elektrische Beleuchtung 1902, S. 147.

3) Hütte 1902, Teil I, S. 362.

4) Hütte 1902, Teil I, S. 349 f.

5) Über andere aber seltener vorkommende Querschnittsformen siehe Grawinkel und Strecker, 6. Aufl., S. 24.

Seitlich wirkende Kräfte sind Winddruck und Leitungszug. Durch Winddruck,[1]) der in mittleren Breiten maximal mit 125 kg pro m^2 angenommen werden kann, treten erhebliche Gestängebelastungen auf. Derselbe wird bestimmt durch die Formel

$$P = 0{\cdot}12\,248\ F\ v^2 \text{ kg},$$

worin F die senkrecht getroffene ebene Fläche und v die Windgeschwindigkeit bedeuten; hiernach ergeben sich die in Tabelle No. 3 gegebenen Belastungen:

Tabelle No. 3.

Windgeschwindigkeit in m/sec v	Winddruck in kg für den qm senkrecht getroffener Fläche P
10	12
20	49
30	110
40	196

Runde massive Leitungen und Maste bieten aber dem Winde keine ebenen, sondern zylindrische Flächen, so dass nur ein Teilbetrag der Schnittfläche, den wir mit 0·67 derselben in die Rechnung einsetzen, in Betracht kommt.[2]) Bei viereckigen Gittermasten und bei verseilten Leitungen sind dagegen die vollen Flächen zu berücksichtigen, bei letzteren, weil sich in den einzelnen Windungen des Seiles der Wind fängt. Der Angriffspunkt des Windes liegt im Schwerpunkt der getroffenen Mastfläche, der mit genügender Genauigkeit in der Mitte des Mastes genommen werden kann.

Die Maste sind nun nicht zylindrisch, sondern kegelförmig. Die Zunahme des Durchmessers vom Zopf zum Fuss soll mindestens 1 cm auf jeden Meter betragen. Die Fläche F_1 eines Mastes ergiebt sich somit, wenn d_1 den Durchmesser am Zopf, d_2 den am Fuss bedeutet, zu

$$F_1 = \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right) L$$

und das Biegungsmoment durch Winddruck auf einen runden Mast

$$P_m = 0{\cdot}12\,248\ F_1 \cdot a\, v^2,$$

worin a die Entfernung des Schwerpunktes vom Fusspunkt, für unseren Fall also halbe Mastlänge bedeutet.

Analog dem Vorstehenden ist der Winddruck auf die Leitungen zu berechnen.

Durch Windbelastung werden die Leitungen nun aus ihrer senkrechten Ruhelage abgetrieben. Den Abtrieb A aber kennen zu lernen, ist wichtig, weil hiernach auch die Entfernungen der Leitungen unter sich festgelegt werden können.

---

1) Näheres siehe Hütte 1902, Teil I, S. 261.

2) Nach D'AUBUISSON wird gesetzt: $P = 0{\cdot}085 \cdot F^{1{\cdot}1} \cdot v^2$ kg.

Es gilt hierfür die Beziehung

$$M = \sqrt{P^2 + G^2},$$

wenn mit M die Resultierende aus dem nach unten strebenden Gesamtgewicht G der Leitung und dem horizontal wirkenden Winddruck P bezeichnet wird.

Es verhält sich aber auch

$$\frac{A}{f} = \frac{P}{M} \qquad f = \text{Durchhang}$$

und hieraus ergiebt sich dann

$$A = \frac{f P}{\sqrt{P^2 + G^2}}.$$

Die nachstehende Tabelle giebt die numerischen Werte des Abtriebes für eine Leitung von 8 mm ⌀ für verschiedene Spannweiten und eine Windgeschwindigkeit von 30 m an.

Tabelle No. 4.

	30 m	40 m	50 m
$f =$	0·9 m	1·2 m	1·5 m
$P =$	18 kg	24 kg	30 kg
$G =$	13·35 „	17·80 „	22·3 „
$A =$	0·724 m	0·964 m	1·22 m

Der durch die Leitungen hervorgerufene seitliche Zug ergiebt sich einmal aus dem Gewicht derselben und zweitens durch den Zug des gespannten Drahtes, der um so grösser ist, je straffer die Leitungen gespannt werden, je geringer also der Durchhang[1]) ist. Zug und Durchhang verändern sich mit der Temperatur.

86. Durchhang. Die bei der Durchhängung eines Drahtes, gleiche Höhenlage der Stützpunkte vorausgesetzt, entstehende Kurve ähnelt einer Parabel, bei welcher die folgenden Beziehungen bestehen.

Zieht man durch zwei Punkte A und B der Parabel, welche gleiche Entfernung vom Scheitelpunkt C haben, Tangenten, so hat der Schnittpunkt derselben D vom Scheitelpunkt der Parabel dieselbe Entfernung, wie dieser von der durch A und B gezogenen Geraden. Der Durchhang ist also

$$f = CD = CE.$$

Er berechnet[2]) sich zu

$$f = \frac{q\, l^2}{8\, S}.$$

Die Länge des Drahtes ergiebt sich aus der Parabelgleichung zu

$$L_D = l + \frac{8 f^2}{3\, l},$$

1) Näheres über den Durchhang siehe: ETZ 1894, S. 437, HERZOG; ETZ 1902, S. 593, KROHNE; ETZ 1903, S. 37, 174, OTTO; ETZ 1903, S. 109, 212, KROHNE; ETZ 1903, S. 255, v. GLINSKI; ETZ 1903, S. 802, SENGEL; Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1899, S. 199.

2) Näheres siehe BLAVIER, Nouveau traité de Télegraphie électrique, Bd. 2.

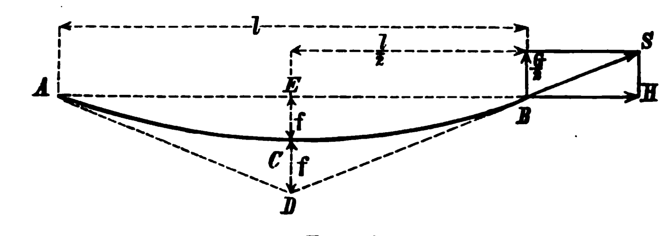


Fig. 138.

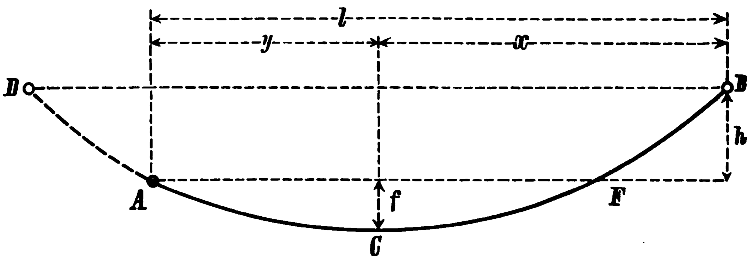


Fig. 139.

worin g das Gewicht der Leitung für den laufenden Meter, l die Entfernung zwischen den Aufhängepunkten und S die Spannung des-Drahtes am tiefsten Punkt bedeuten.

Die Leitungen werden nun stets so gespannt, dass der Durchhang etwa $2-2^1/_2\,^0/_0$ der Mastentfernung beträgt; in seltenen Fällen wird $f = 3\,^0/_0\, l$ gewählt. Die Zugspannung im Draht beträgt am tiefsten Punkt unter alleiniger Berücksichtigung des Gewichtes

$$S = \frac{g\,l^2}{8f}\ \text{kg}.$$

An den Aufhängepunkten ist die Spannung grösser und zwar um $g \cdot f$ kg, so dass sich für diese Punkte ergiebt

$$S_1 = \frac{g\,l^2}{8f} + g \cdot f\ \text{kg}.$$

Befinden sich die Stützpunkte A und B in verschiedener Höhenlage (Fig. 139), so liegt der tiefste Punkt des durchhängenden Drahtes demjenigen Stützpunkt näher, der tiefer liegt. Er rückt ihm um so näher, je grösser die Höhendifferenz ist. Der Durchhang wird unter Inanspruchnahme der Hilfsparabel DCB und ACE bestimmt und ergiebt sich in der Entfernung z von A

$$z = \frac{g\,l^2 + 2\,h\,S}{2\,g\,l}$$

und x von B

$$x = \frac{g\,l^2 - 2\,h\,S}{2\,g\,l}.$$

Ist z berechnet, so kann aus der oben angegebenen Formel f der Parabel ACE bestimmt werden.

Wichtig ist der Einfluss der Temperatur. Da sich der Draht mit zu-der Erwärmung ausdehnt, so wird der Durchhang f grösser und die

Spannung S geringer. Die Gestänge werden also entlastet, dagegen der Abtrieb grösser. Bei abnehmender Temperatur verkürzen sich die Leitungen und die mechanische Spannung steigt rasch. Beim Spannen muss daher der Durchhang so gewählt werden (siehe Tabelle No. 5 und 6), dass bei der niedrigsten Temperatur, welche am Montageort erwartet werden kann, das Leitungsmaterial mechanisch nicht mehr belastet wird, als zulässig. Dass hierbei die bereits erwähnten atmosphärischen Einflüsse (Schnee und Eisbelastung, Winddruck) berücksichtigt werden müssen, ist klar. Welche Belastung zulässig ist, sagen die Sicherheitsvorschriften: Leitungen dürfen bei minus 20° C. mit fünffacher, solche aus hartgezogenem Material mit dreifacher Sicherheit beansprucht werden.

Wird ein Körper von einer bestimmten Länge l_a um t^0 C. erwärmt, so wird seine Länge

$$l_t = l_a (1 + \alpha t).$$

Für α (lineare Ausdehnungskoeffizient) ist zu setzen für:

Aluminium	0·00002180
Bronze	0·00002848
Eisendraht	0·00001235
Kupfer	0·00001643
Stahldraht	0·00001079.

Hierzu kommt jedoch noch die Dehnung des Drahtes; für diese im Zusammenhang mit der linearen Ausdehnung geben HERZOG und FELDMANN[1]) die Formeln:

$$t = \frac{l^2 \xi^2}{24 \beta} \left(\frac{1}{p_t^2} - \frac{1}{p^2_0} \right) - \frac{\lambda}{\beta} (p_t - p_0)$$

$$t = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{8}{3} \cdot \frac{f_t}{l^2} - \frac{\lambda \xi}{8} \cdot \frac{l^2}{f_t} \right) - \left(\frac{l^2 \xi}{24} \cdot \frac{1}{p_0^2} - \lambda p_0 \right) \right]$$

worin bedeuten:

f = Durchhang bei der Temperatur t,
l = Entfernung der Aufhängepunkte,
λ = spez. Dehnung pro 1 kg Zugspannung,
β = spez. Dehnung pro 1° C.,
ξ = spez. Gewicht,
p_0 = 4 kg pro mm² zulässige spez. Spannung bei — 20° C.,[2])
p_t = spez. Spannung bei t^0 C. (gezählt von — 20° C. an).

Um den gewünschten Durchhang der Leitungen zu erreichen, werden an den Masten in der Höhe der Aufhängungen Zeichen angebracht, von denen nach unten die senkrechte Projektion des tiefsten Punktes des durchhängenden Drahtes auf den Mast abgetragen und gekennzeichnet wird (Fig. 141). Beim Spannen der Drähte ist darauf zu achten, dass der Scheitel der durch den Draht gebildeten Parabel in die von den Kennzeichen gebildete Visierlinie fällt.[3])

---

1) Handbuch der elektrischen Beleuchtung 1901, S. 145.
2) ETZ 1894, S. 437; 1897, S. 147; 1896, S. 721; 1897, S. 395.
3) Vgl. auch ETZ 1900, S. 768.

hhang

40°

58

90

40°

44

50

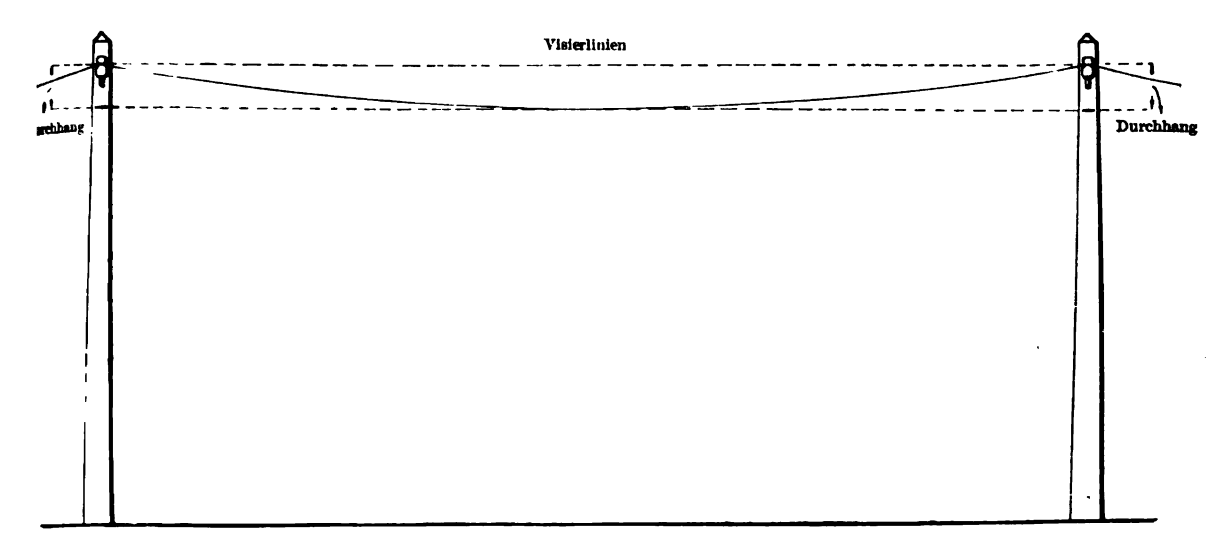


Fig. 141.

Es kann nun zwar der Durchhang für die verschiedenen Querschnitte und Temperaturen berechnet werden; für den Monteur ist dies jedoch zu zeitraubend. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft hat daher die folgenden Tabellen No. 5 und No. 6 aufgestellt, auf Grund deren die Leitungen gespannt werden. Für die Praxis genügen diese angenäherten Werte, die allerdings eine höhere Belastung des Leitungsmaterials vorsehen, als nach obiger Formel von HERZOG & FELDMANN möglich, vollkommen.

Tabelle No. 5.

Durchhang bei Kupferleitungen.

Spannweite		10 m				20 m				30 m				40 m				50 m			
Temperatur in Grad Celsius		−20°	0°	+20°	+40°	−20°	0°	+20°	+40°	−20°	0°	+20°	+40°	−20°	0°	+20°	+40°	−20°	0°	+20°	+40°
rch-ang in tern	für Leitung bis 25 mm²	0·020	0·025	0·030	0·035	0·08	0·09	0·012	0·015	0·18	0·19	0·20	0·22	0·30	0·33	0·35	0·40	0·48	0·50	0·55	0·58
	für Leitung bis 120 mm²	0·030	0·035	0·040	0·045	0·10	0·14	0·16	0·18	0·25	0·27	0·30	0·32	0·45	0·50	0·54	0·60	0·75	0·80	0·84	0·90

Tabelle No. 6.

Durchhang bei Aluminiumleitungen.

Spannweite		10 m				20 m				30 m				40 m				50 m			
Temperatur in Grad Celsius		−20°	0°	+20°	+40°	−20°	0°	+20°	+40°	−20°	0°	+20°	+40°	−20°	0°	+20°	+40°	−20°	0°	+20°	+40°
rch-ang in tern	für Leitung bis 42 mm²	0·015	0·015	0·015	0·020	0·05	0·06	0·06	0·07	0·12	0·13	0·15	0·17	0·20	0·24	0·26	0·28	0·32	0·34	0·40	0·44
	für Leitung bis 197 mm²	0·015	0·020	0·020	0·025	0·05	0·06	0·07	0·08	0·14	0·15	0·16	0·18	0·26	0·28	0·30	0·32	0·37	0·41	0·45	0·50

87. Zulässige Gestängebelastung.

Damit die Gestänge nicht brechen, darf höchstens gesetzt werden

$$P_k\, L = k\, W,$$

worin k die höchst zulässige Beanspruchung des Materials und W das Widerstandsmoment des Mastquerschnittes bedeutet.

Für den kreisförmigen Querschnitt ist $W = \frac{\pi}{32}\, D^3$,

„ „ ringförmigen „ „ $W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$.

Die Gestänge dürfen aber nicht bis zur Bruchbelastung in Anspruch genommen werden, und zwar pflegt man bei Holzmasten mit der 10 fachen, bei Eisen mit der 5 fachen Sicherheit zu rechnen.

Die Sicherheitsvorschriften des V. D. E. schreiben über die Festigkeit der Niederspannungsgestänge nichts vor, da sie mehr für die Sicherheit des Betriebes, nicht aber für die gegen Feuer- und Lebensgefahr in Frage kommen.[1])

Für Hochspannung dagegen gelten die oben angegebenen Werte.[2])

Für Winkelpunkte ergiebt sich die Resultierende aus den Leitungszügen nach dem Parallelogramm der Kräfte zu

$$R = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2\, P_1\, P_2 \cos \alpha}.$$

Hieraus wird, wenn $P_1 = P_2$ ist, die Leitungen also gleich gespannt sind:

$$R = 2\, P \cos \frac{\alpha}{2}.$$

Da die Drahtspannungen den oben angegebenen Grenzwert $\frac{k\, W}{L}$ nicht übersteigen dürfen, so ergiebt sich

$$\frac{k\, W}{L} = 2\, P \cos \frac{\alpha}{2},$$

$\cos \frac{\alpha}{2}$ ist aber $= \frac{l}{2\, r}$, wenn l der Mastenabstand und r der Radius der Kurve und hieraus ergiebt sich dann der zulässige Mastenabstand in Kurven zu:

$$l = \frac{r\, k\, W}{P\, L}.$$

88. Dimensionierung der Maste.

Die übrigen für die Dimensionierung eiserner Maste erforderlichen Daten können am besten an Hand eines Beispiels besprochen werden.

Verlangt werde ein Leitungsmast, welcher nach Skizze No. 142 beansprucht werde. Der eine Mast ist 30, der andere 40 m entfernt. Der Leitungswinkel betrage 135°. Es soll ein Kupferdraht von 70 mm² verlegt werden. Der Durchhang betrage höchstens 3 % der freien Länge.

Für die Strecke von 30 m gilt nun folgendes:

Die Länge des Drahtes, berechnet nach der Formel für L_D (S. 134) beträgt 30·07 m, sein Gewicht bei einem spez. Gewicht von 9 — 18·94 kg.

Da der Durchmesser des Drahtes 9·45 mm beträgt, so ist infolgedessen die dem Winde gebotene Fläche

$$0{\cdot}00945 \times 30{\cdot}07 = 0{\cdot}284 \text{ m}^2,$$

---

1) Dr. C. L. Weber, Erläuterungen, 6. Aufl., S. 90, und ETZ 1905, S. 155.

2) § 231 der Hochspannungsvorschriften.

da aber nur das 0·67 fache der Projektion des Zylinders wirksam ist, so kommen nur

$$0{\cdot}67 \cdot 0{\cdot}284 = 0{\cdot}19 \text{ m}^2$$

in Betracht. Bei 125 kg Winddruck pro m² ergiebt sich für den Draht

$$0{\cdot}19 \cdot 125 = 23{\cdot}75 \text{ kg}.$$

Für die Strecke von 40 m ergiebt sich

Länge des Drahtes	40·10 m
Gewicht des Drahtes	25·26 kg
Winddruck	31·7 „

Bezeichnen nun Q die Summe von Eigengewicht und Winddruck, so ergiebt sich nach Fig. 138 zwischen der Auflagereaktion $\frac{Q}{2}$ und der Horizontalspannung H die Beziehung

$$\frac{Q}{2} : H = 2f : \frac{l}{2}.$$

Es ist demnach

$$H = \frac{Q \cdot l}{8 \cdot f}$$

und die Totalspannung im Draht, S_r = der Resultierenden aus $\frac{Q}{2}$ und H:

$$S_r = \sqrt{\left(\frac{Q}{2}\right)^2 + H^2}.$$

Für unseren Fall ergiebt sich daher für die Strecke von 30 m:

$$H = \frac{Q \cdot l}{8 \cdot f} = \frac{(18{\cdot}94 + 23{\cdot}75) \cdot 30}{8 \cdot 0{\cdot}9} = 177{\cdot}8 = \sim 178 \text{ kg}$$

und

$$S = \sqrt{\left(\frac{42{\cdot}69}{2}\right)^2 + 178^2} = \sim 180 \text{ kg}.$$

Für die Strecke von 40 m ergiebt sich

$$H_1 = \sim 237 \text{ kg},$$
$$S_1 = \sim 239 \text{ kg}.$$

Unter der Annahme, dass die beiden Drähte einen Winkel von 135° bilden, ergiebt sich am einfachsten graphisch aus dem Parallelogramm der Kräfte die auf den Mast resultierend wirkende Kraft zu

$$P = \sim 152 \text{ kg}.$$

In der Praxis wird man jedoch den Wert auf 200 kg abrunden.

Nach den Regeln der Festigkeit besteht nun unter Berücksichtigung umstehender Skizze folgende Bedingung:

$$W = \frac{H \cdot L}{k_b} + \frac{H_1 \cdot L_1}{k_b},$$

worin bedeutet:

W = Widerstandsmoment am gefährlichen Querschnitt x,
L = wirksamer Hebelarm von P,
P_1 = der auf den Mast wirkende Winddruck,
L_1 = wirksamer Hebelarm von $P_1 = xS$, = Abstand des Schwerpunktes der Mastfläche vom Erdboden.

Je nach Wahl des Mastes wird sich nun ein erforderliches Widerstandsmoment am gefährlichen Querschnitt ergeben und hieraus die erforderlichen Dimensionen.

Es sei für unseren Fall ein quadratischer Winkeleisenmast vorgeschrieben, eine Aufhängungshöhe des Drahtes von 6·5 m, bei einer Länge des Mastes über Erde von 7 m.

Bei einer Materialbeanspruchung von 1200 kg per Quadratcentimeter würde das erforderliche Widerstandsmoment $W = 140$ cm³ betragen, welchem vier Winkeleisen 40 × 40 × 4 mm im Abstande von 325 mm genügen (Fig. 144).

Bei weniger beanspruchten Masten werden Diagonalen aus Flacheisen hergestellt, während bei stärkeren Masten Winkeleisen zur Verwendung kommen.

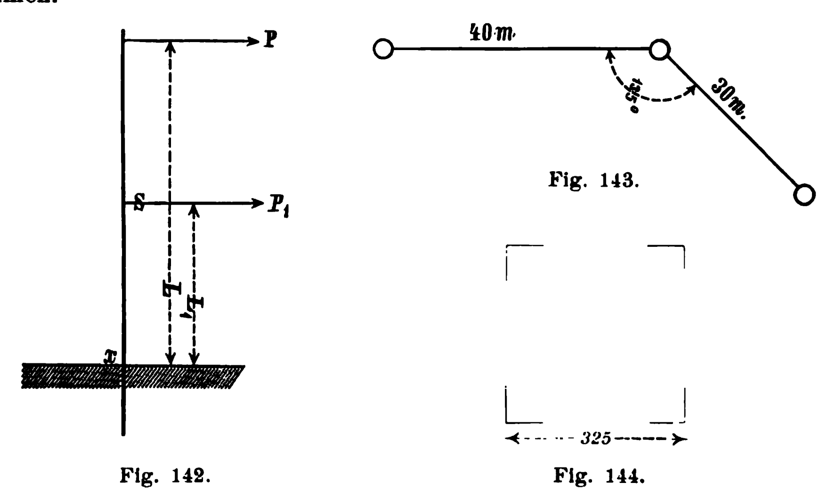


Fig. 142. Fig. 143. Fig. 144.

Wenn sich die Leitungszüge gegenseitig nahezu aufheben, was auf gerader Strecke nahezu stets geschieht, so wird unter ungünstigen Verhältnissen diejenige Beanspruchung des Mastes in die Rechnung eingeführt werden müssen, welche auftritt, wenn der Draht auf einer Seite reisst.

Isolatorenträger.

89. Eiserne Stützen.

Die Isolatoren werden auf besonderen Stützen befestigt, die aus Eisen, seltener aus Holz bestehen.[1])

Im wesentlichen richtet sich die Form der Isolatorstütze nach der Art der Tragkonstruktion. Die Stütze ist ein gerader Bolzen, sobald die Befestigung auf einem Querbalken aus Holz oder Eisen erfolgt. Auch ein hakenförmiger Bügel, der im vertikalen Teile zwei Löcher für Holzschrauben hat, dient als Stütze, deren Befestigung mittels einiger Schrauben unmittelbar am Mast erfolgen kann. Einfacher ist die Befestigung bei der Schrauben- oder Hakenstütze, welche 1857 mit den Borggreve-Glocken zum erstenmal eingeführt wurde.[2])

---

1) Siehe S. 147 und 158.
2) Hdb. XII, S. 620.

Fig. 145.

524

50

140

16

bis hierher mit Masse auszugiessen.

em.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

Je nach Wahl des Mastes wird sich nun ein erforderliches moment am gefährlichen Querschnitt ergeben und hieraus die Dimensionen.

Es sei für unseren Fall ein quadratischer Winkeleisenmast v eine Aufhängungshöhe des Drahtes von 6·5 m, bei einer Län über Erde von 7 m.

Bei einer Materialbeanspruchung von 1200 kg per Qu würde das erforderliche Widerstandsmoment $W = 140$ cm³ bet vier Winkeleisen 40 × 40 × 4 mm im Abstande von 32 (Fig. 144).

Bei weniger beanspruchten Masten werden Diagonalen hergestellt, während bei stärkeren Masten Winkeleisen kommen.

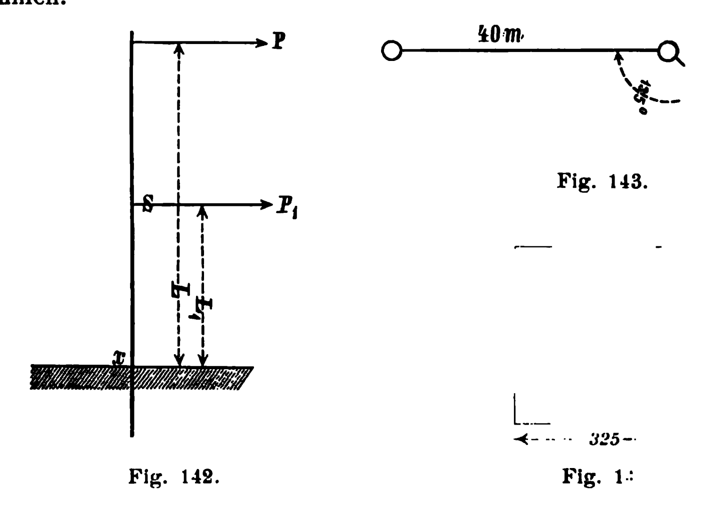


Fig. 142. Fig. 143. Fig. 1

Wenn sich die Leitungszüge gegenseitig nahe gerader Strecke nahezu stets geschieht, so wird hältnissen diejenige Beanspruchung des Mastes in d werden müssen, welche auftritt, wenn der Draht auf

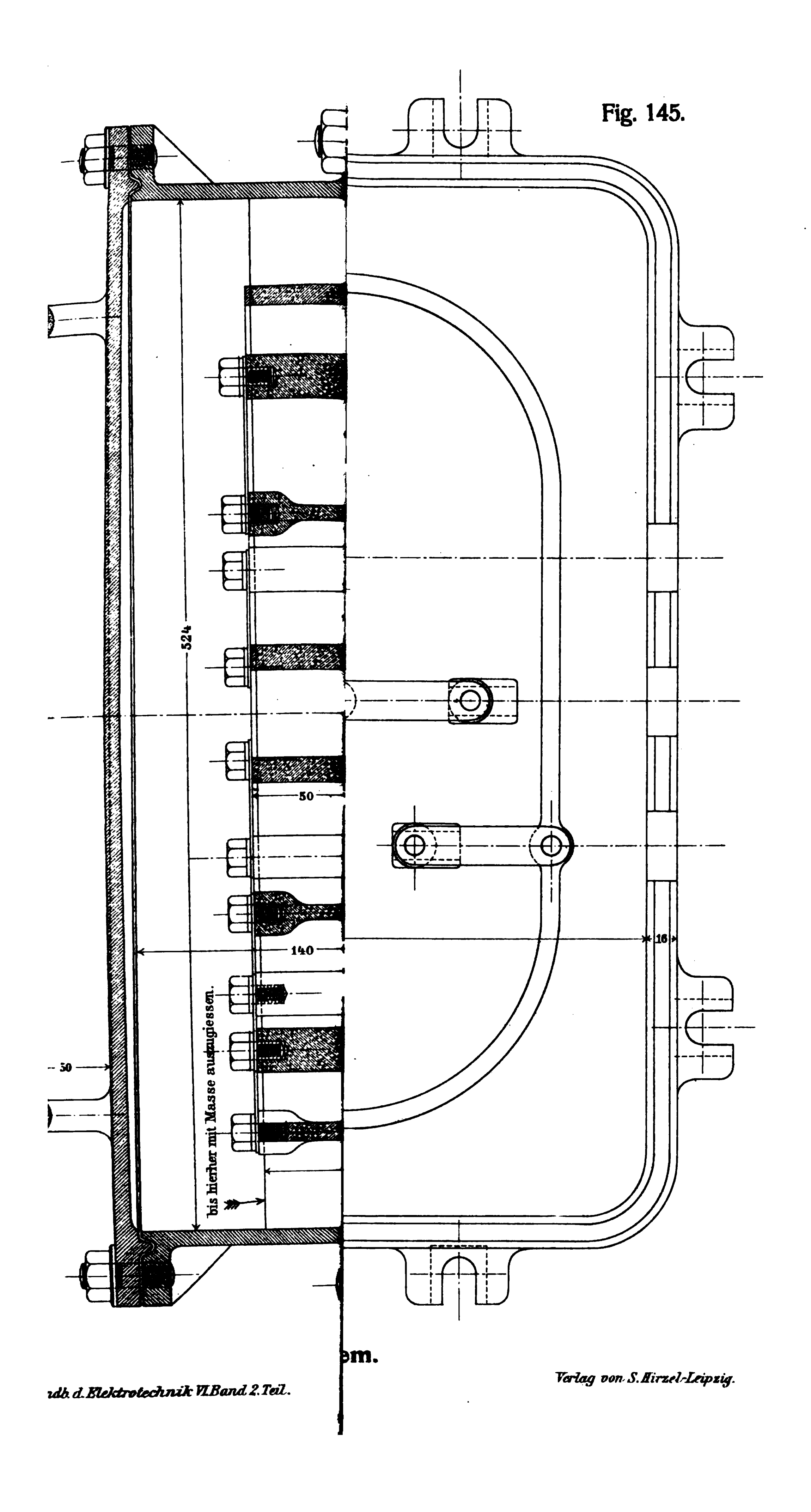
Isolatorenträger.

89. Eiserne Stützen. Die Isolatoren werden auf besonderen Stützen b seltener aus Holz bestehen.[1])

Im wesentlichen richtet sich die Form der Isola der Tragkonstruktion. Die Stütze ist ein gerader B festigung auf einem Querbalken aus Holz oder Eisen erf förmiger Bügel, der im vertikalen Teile zwei Löche hat, dient als Stütze, deren Befestigung mittels einiger bar am Mast erfolgen kann. Einfacher ist die Befestigung oder Hakenstütze, welche 1857 mit den BORGGREVE-Glocke eingeführt wurde.[2])



1) Siehe S. 147 und 158.
2) Hdb. XII, S. 620.



em.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

Die üblichsten Stützen zeigt Fig. 148. In Tabelle No. 7 sind nach den Angaben der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, Berlin, die bei dieser üblichen Stützendimensionen eingetragen, und zwar sind in Tabelle a und b diejenigen der normalen in zwei Grössen, in Tabelle c und d die der verstärkten Stützen, ebenfalls in zwei Modellen, enthalten.

Die normalen Stützen finden stets auf geraden Strecken Anwendung, wo sich die Leitungszüge nahezu aufheben, die verstärkten dagegen an Winkelpunkten oder überhaupt da, wo die Stütze stark auf Zug beansprucht wird.

Als Abspannstützen anderer Form finden die in Fig. 149 gezeichneten Verwendung. Ist es nicht möglich, eine seitliche Befestigung der Stützen zu erreichen, so bieten Deckenstützen mit einem, zwei oder auch drei Armen ein bequemes Hilfsmittel, hauptsächlich aber in grossen Hallen, Bahnhofsüberdachungen oder dergl. (Fig. 150).

Für die vielfach verwendeten SHAKLE-Isolatoren findet die in Fig. 151 wiedergegebene Befestigungsweise Anwendung.

Tragkonstruktionen, Gestänge und Traversen.

90. Befestigung der Stützen und Traversen an Masten.

An den Masten werden die auf gebogenen Stützen befestigten Isolatoren direkt eingeschraubt, wobei die oberste Stütze 30 cm von der Spitze entfernt bleibt. Sie werden dann abwechselnd auf beiden Seiten angeordnet. Durch dieses Übereinandersetzen wird aber eine sehr grosse Bauhöhe bedingt, so

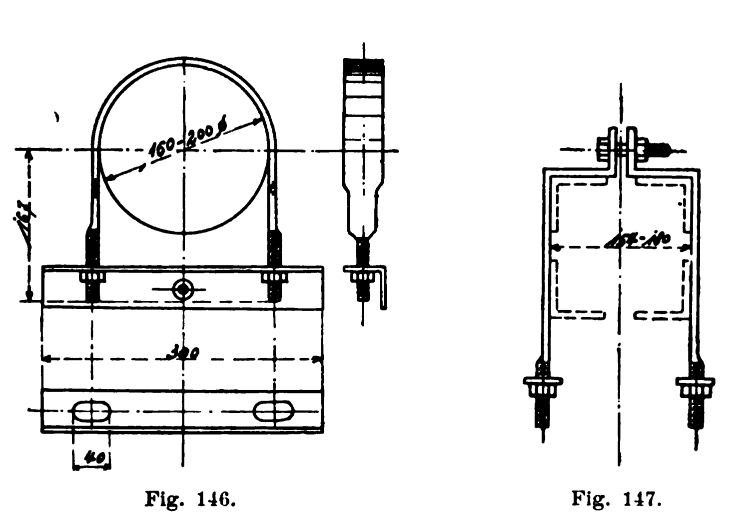


Fig. 146. Fig. 147.

dass sehr lange Masten nötig werden, um die erforderlichen Entfernungen zwischen dem untersten Leiter und der Erde und zwischen den einzelnen Leitungen unter sich innehalten zu können. Es werden daher auf diese Art höchstens 6—8 Leitungen auf jeder Mastseite untergebracht. Bei einer grösseren Anzahl werden am Mast Traversen angeordnet, die aus Eisen, aber auch aus Holz sein können. Letzteres wird in Deutschland seltener, in Amerika häufig angewendet. Bedauerlicherweise wird die Befestigung der Traversen am Mast aber häufig so ausgeführt, dass der letztere eingeschnitten wird, um der Traverse Halt zu geben, ausserdem wird dann noch ein Bolzen durchgezogen, so dass der Querschnitt des Mastes mehrfach geschwächt wird.

Tabelle No. 7.

Normale Stützen. a) Grösse I.

Art	Gewicht in kg	a	b	c	d	e	f
gerade, mit langem Gewindezapfen	0·3	60	30	80	35	13	1/2"
„ „ kurzem „	0·215	40	10	80	35	13	1/2"
gebogen, mit langem „	0·59	80	5/8"	45	35	13	93
„ „ kurzem „	0·55	50	5/8"	45	35	13	93
„ „ Holzschraube	0·41	100	16	45	35	13	93
„ „ Steinschraube	0·48	120	16	45	35	13	93
Hakenstütze	0·52	60	5/8"	70	35	13	93

b) Grösse II.

Art	Gewicht in kg	a	b	c	d	e	f
gerade, mit langem Gewindezapfen	0·50	80	40	110	50	16	5/8"
„ „ kurzem „	0·45	50	10	110	50	16	5/8"
gebogen, mit langem „	0·75	105	5/8"	60	50	16	110
„ „ kurzem „	0·66	65	5/8"	60	50	16	118
„ „ Holzschraube	0·54	130	16	60	50	16	118
„ „ Steinschraube	0·625	140	16	60	50	16	118
Hakenstütze	0·91	80	3/4"	110	50	16	118

Verstärkte Stützen. c) Grösse I.

Art	Gewichte	a	b	c	d	e	f
gerade, mit langem Gewindezapfen	0·36	65	35	80	35	13	1/2"
„ „ kurzem „	0·26	35	10	80	35	13	1/2"
gebogene, mit langem „	0·55	90	5/8"	45	35	13	93
„ „ kurzem „	0·50	60	5/8"	45	35	13	93
„ „ Holzschraube	0·54	110	16	45	35	13	93
„ „ Steinschraube	0·51	120	16	45	35	13	93
Hakenstütze	0·66	75	5/8"	70	35	13	93

d) Grösse II.

Art	Gewichte	a	b	c	d	e	f
gerade, mit langem Gewindezapfen	0·65	75	35	100	50	16	5/8"
„ „ kurzem „	0·60	50	15	100	50	16	5/8"
gebogene, mit langem „	1·14	120	3/4"	60	50	16	120
„ „ kurzem „	1·05	85	3/4"	60	50	16	120
„ „ Holzschraube	0·70	120	20	60	50	16	120
„ „ Steinschraube	0·75	140	20	60	50	16	120
Hakenstütze	1·035	80	3/4"	95	50	16	120

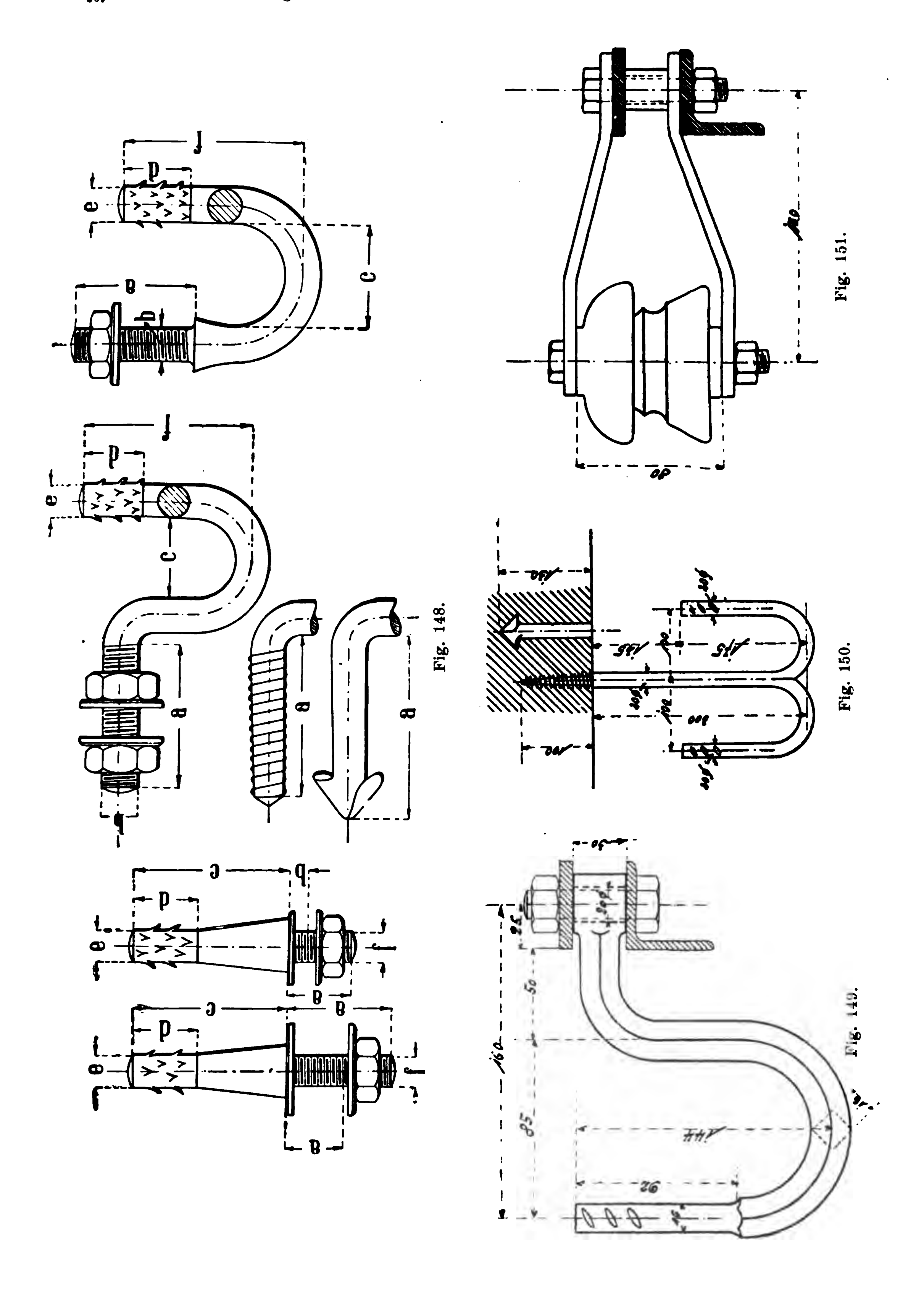


Fig. 148.

Fig. 151.

Fig. 150.

Fig. 149.

Es empfiehlt sich daher, die Traversen mit Hilfe von Ziehbändern am Mast zu befestigen, die dem Mastquerschnitt entsprechend rund (Fig. 146) oder viereckig (Fig. 147) ausgeführt werden. Letztere Art ist besonders zum nachträglichen Anbringen von Traversen an eisernen Masten üblich. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft verwendet Universalziehbänder, deren Bügel verschiebbar ist und infolgedessen für verschiedene Mastquerschnitte ausreicht. Das in Fig. 152a gezeichnete Modell reicht für Maste von 75

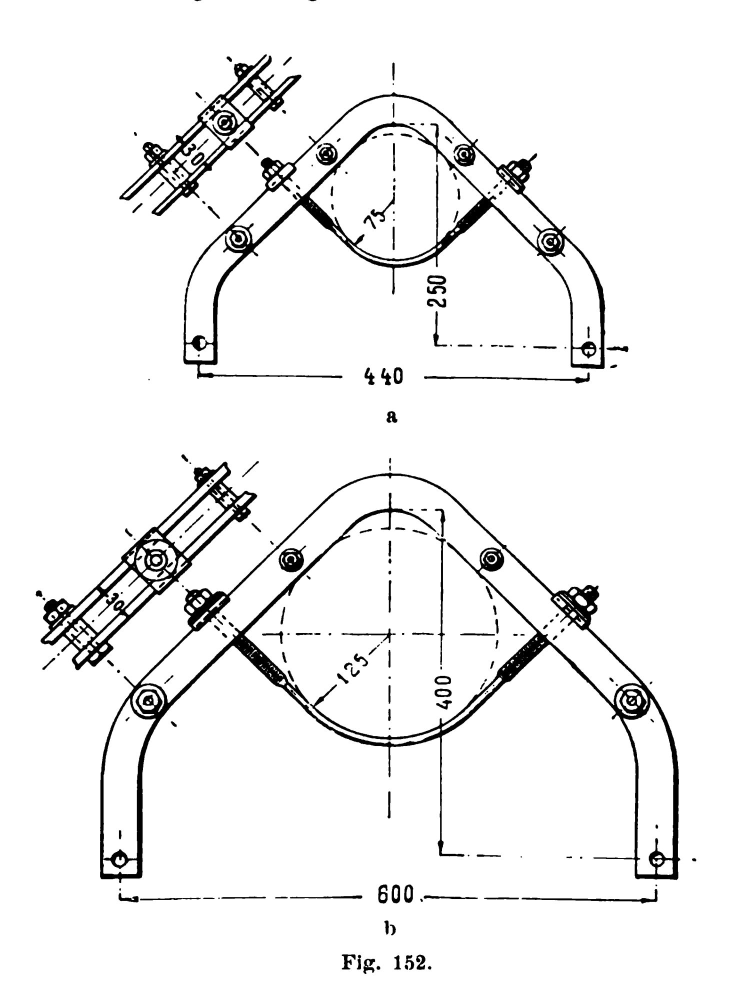


Fig. 152.

bis 125 und das in Fig. 152b wiedergegebene für solche von 125 bis 220 Zopfdurchmesser.

Die eisernen Traversen bestehen aus Winkel- oder U-Eisen, wie dies auch aus den Zeichnungen Fig. 153a und b hervorgeht. Laden die Traversen weit aus, so werden sie an ihren Endpunkten noch miteinander verbunden und durch schräg nach dem Mast laufende Stützen versteift.[1])

An Gebäuden können die Isolatorenstützen, wenn nur wenige Leitungen zusammenliegen, direkt am Mauerwerk übereinander angeordnete Streben halten (Fig. 154).

1) Vgl. auch S. 146, Gestänge der SIEMENS-SCHUCKERT Werke, Wien.

91. Gestänge.

Auch die in Fig. 155 a und b wiedergegebenen Rohrgestänge bieten eine bequeme Montage. Die Isolatorenstützen sind zu Schellen ausgebildet, mit denen sie das Rohr umfassen. Durch die Wahl anderer doppelseitiger

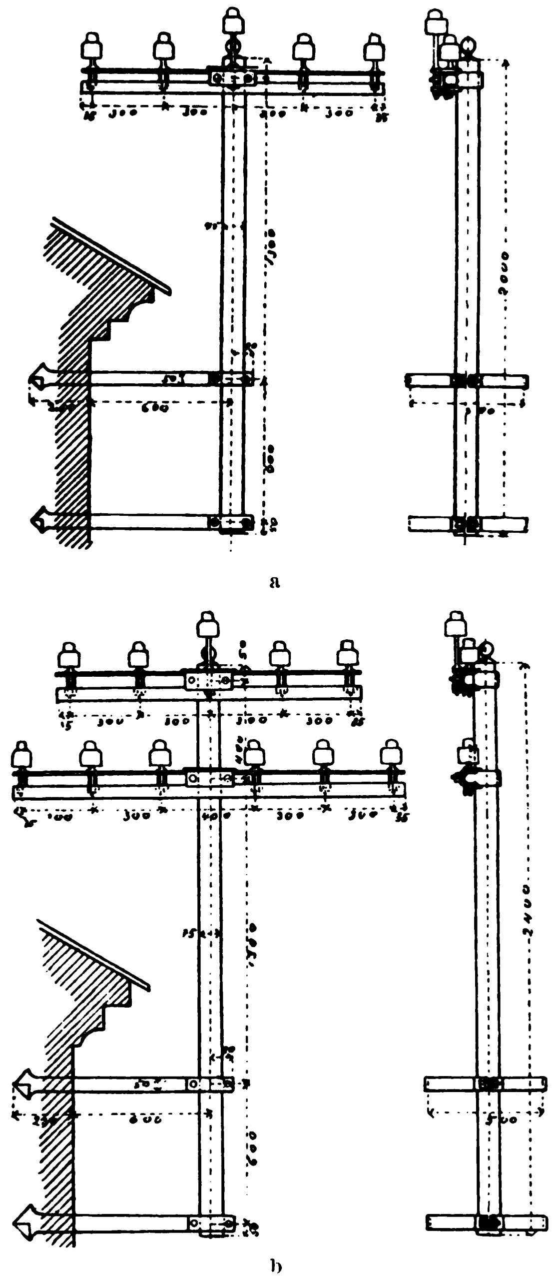


Fig. 153.

Schellen-Isolatorenstützen (Fig. 156 a und b) kann die Anzahl der an einem Rohr angebrachten Isolatoren nachträglich erhöht werden. Statt der Stützen mit Schellen können auch (Fig. 155 a) solche verwendet werden, die mit

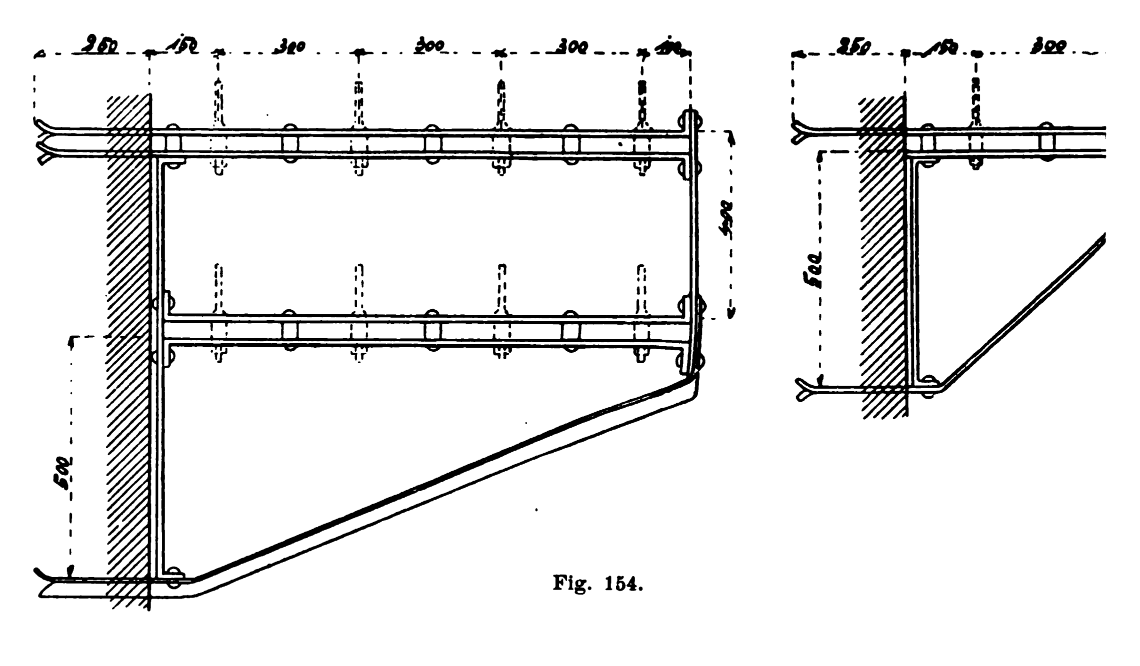
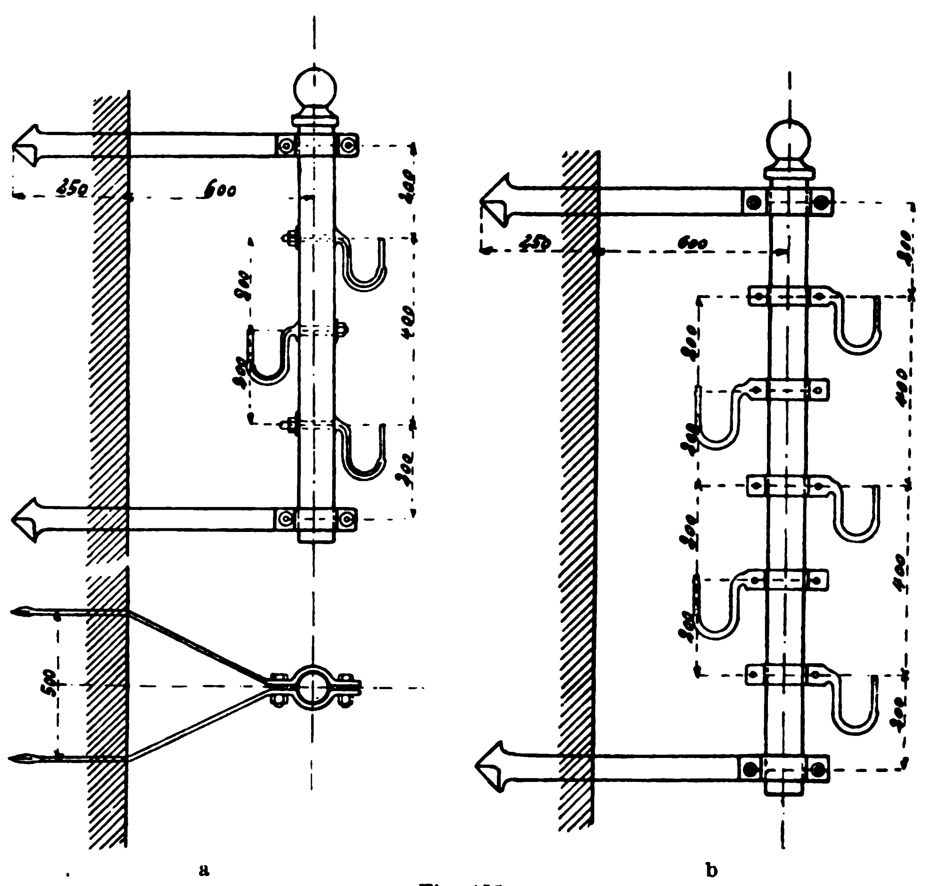


Fig. 154.

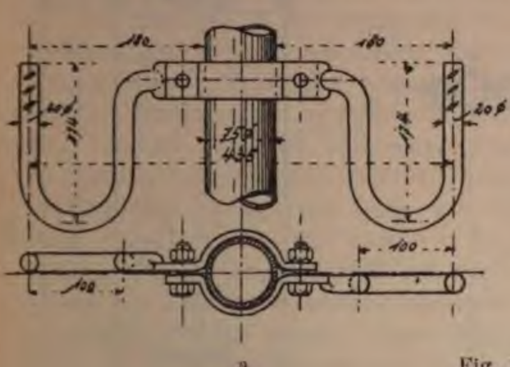


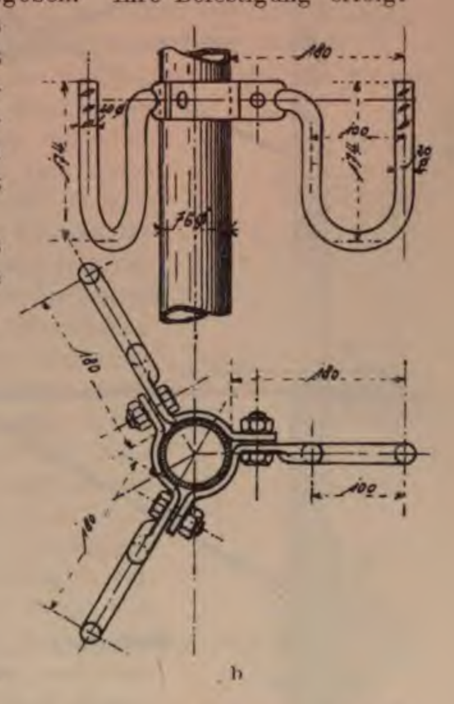
a b

Fig. 155.

einem durch das Rohr gehenden Bolzen festgeschraubt werden. In schmalen Strassen und bei niedrigen Häusern ist die Anwendung der weitausladenden Konsole nicht möglich, hauptsächlich, weil die Leitungen zu niedrig hängen, auch zu nahe an Fenstern vorbeiführen würden. Es werden in solchen Fällen Rohrständer verwendet, die über den Dachfirst hinausragen und in gleicher Weise wie die Maste mit Traversen ausgerüstet werden. Den Rohren wird ein Durchmesser von etwa 75 mm gegeben. Ihre Befestigung erfolgt am Gebäude, wie es Fig. 157 im Aufriss und Fig. 153 in der Ansicht zeigt. Statt dieser Befestigungsart können die Rohrständer auch unmittelbar an Gebäude angelegt werden, an denen sie in der in Fig. 159 wiedergegebenen Art festgeschellt werden.

Die Rohrständer finden vielfach auch als Aufsätze auf Holzmaste Verwendung, um eine





a Fig. 156. b

einheitliche Anordnung der Anlage möglich zu machen, wenn die Leitungen teilweise auf Gestängen an Häusern, teilweise auf Masten verlegt werden. Auch in diesem Fall genügt ein festes Anschellen der Rohre, die Maste sollen nicht angeschnitten werden, um ein Aufsetzen derselben zu ermöglichen (vgl. Fig. 158).

92. Hölzerne Stützen und Traversen.

In Europa sind bisher wenig oder gar keine extremen Hochspannungsanlagen gebaut worden, ihr Bau ist jedoch nur eine Frage der Zeit.[1]) Es wird jedoch schon bei Anlagen mit 10000—20000 Volt versucht, eine bessere Isolation der Fernleitungen durch hölzerne Stützen zu erreichen, hauptsächlich unter dem Hinweis darauf, dass dieselben in Amerika bei dem Gestängebau für Hochspannungsleitungen fast allgemein gebräuchlich sind.[2]) Der Grund hierfür liegt einmal darin, dass es, wie auf Seite 161 gesagt, in Amerika schwieriger als in Deutschland ist, Isolatoren von sicherer Isolierfähigkeit zu erhalten, dann aber auch der hier und da bestehende Glaube, dass diese Stützen, weil aus Holz hergestellt, die gesamte Isolation des Leitungsnetzes wesentlich erhöhen und hierdurch eine grössere Sicherheit erreicht wird. Indessen ist diese bei weitem nicht so gross, wie auf den ersten Blick erscheint und Durchschläge hölzerner Bolzen bilden in Anlagen, welche in Amerika mit sehr hohen Spannungen arbeiten, eine ständige Erscheinung.

1) Zur Zeit schon im Bau (Ruhrthalsperre mit 40000 Volt Gebrauchsspannung).
2) Electrical Review, 28. März 1903, S. 445—447.

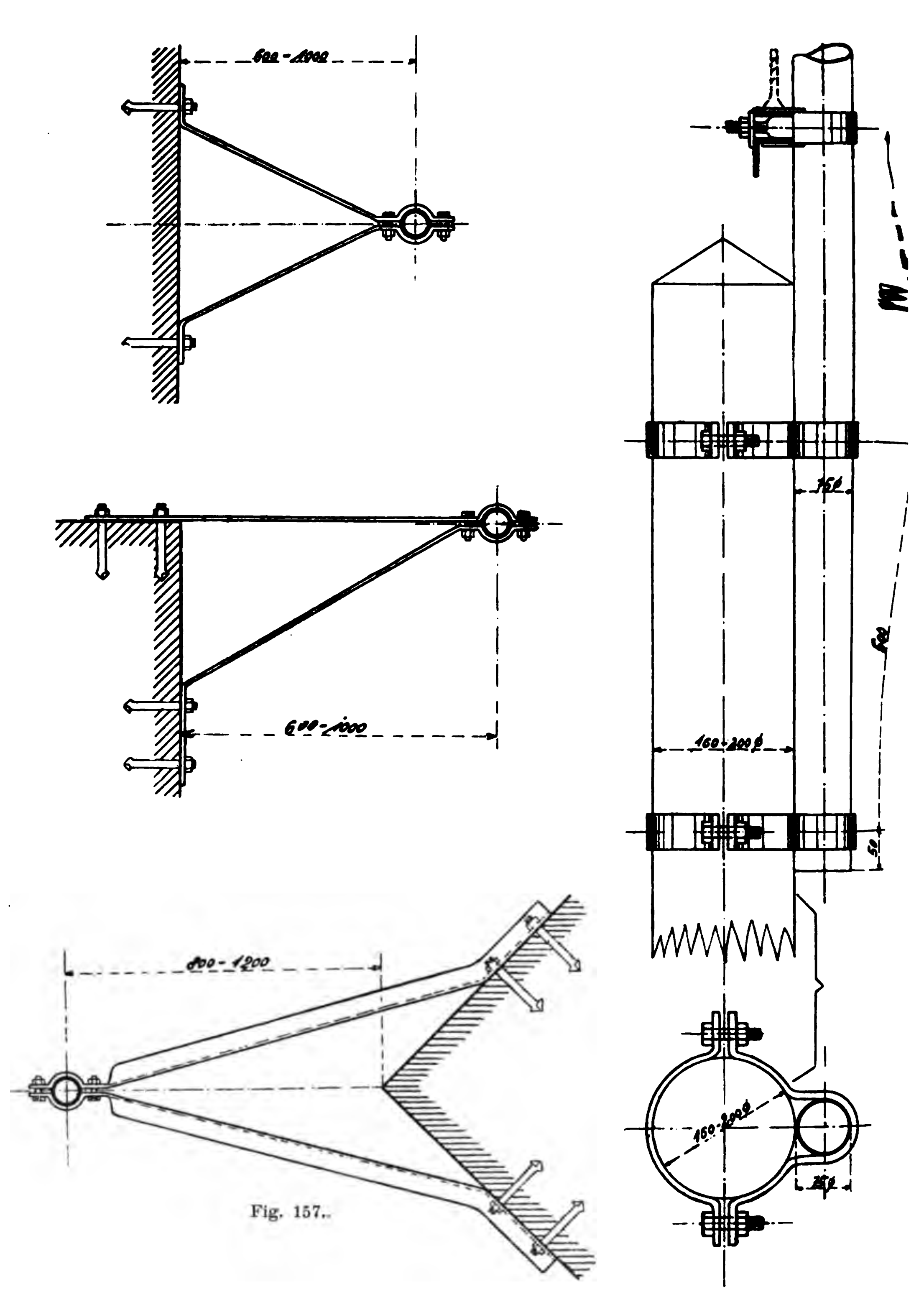


Fig. 157.

Fig. 158.

Diese Bolzen werden gewöhnlich aus Akazien-, Eichen- oder Eukalyptusholz hergestellt und meistens sorgfältig mit heissem Asphalt, Paraffin- oder Leinöl behandelt, damit die Isolierfähigkeit durch Atmosphärilien weniger beeinflusst wird.

Sie bewähren sich bei Verwendung mit Glas- oder gutglasierten Porzellan-Isolatoren bei Spannungen von 25—30000 Volt sehr gut; ungewöhnliche Bolzenzerstörungen kamen bei diesen Spannungen selten vor und konnten teilweise auf poröse oder zerbrochene Isolatoren zurückgeführt werden.

93. Durchschläge hölzerner Bolzen.

Diese guten Erfolge[1]) sind allerdings in erster Linie wohl der guten Isolation der Isolatoren zu verdanken und weniger der Isolierung durch die hölzernen Bolzen. Doch haben die für 40000 Volt und höhere Spannungen von einem Fabrikanten hergestellten Isolatoren nicht den gleichen Sicherheitsfaktor wie die von demselben Fabrikanten offerierten Isolatoren für niedrigere Spannungen. Das Durchbrennen der Bolzen bei 10—30000 Volt-Isolatoren ist, da dieselben in der Regel sehr kleine Oberflächen-Stromverluste zeigen, bei diesen Spannungen verhältnismässig selten. Mehr oder weniger häufige Bolzendurchschläge kommen nur an Orten, in denen salzige Winde oder starke Seenebel auftreten, oder in der Nähe chemischer Fabriken vor, und zwar unabhängig von der verwendeten Isolatortype oder der vorhandenen Spannung. Bei einer Anlage kamen z. B. grosse Störungen infolge Durchbrennens der Bolzen vor, trotzdem in derselben bei 440 Volt Spannung Isolatoren für 10000 Volt verwendet worden waren. Diese Störungen hatten ihre Ursache in Niederschlägen auf die Isolatoren aus einer benachbarten chemischen Fabrik. Sobald Regen eintrat, kamen keine Durchschläge vor. Kennt man die Ursache derartiger Fälle, so ist eine Abhilfe jedoch leicht möglich.

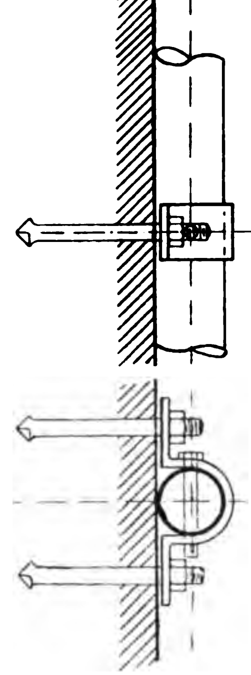


Fig. 159.

Bei 40- und 50000 Volt-Anlagen tritt der Bolzendurchschlag anders auf. Scheidet man all die durch zerbrochene oder unvollkommene Isolatoren verursachten Stromverluste aus, so ist der wirklich auf der Oberfläche und durch den Bolzenkörper fliessende Strom sehr gering. Auffallend ist jedoch, dass ein Durchschlagen des Holzgewindes gegen die Eisentraverse in vielen Fällen erfolgt, die Isolatoren dabei aber fast nie beschädigt werden; auch kein Querträger wurde von dem über die Oberfläche der Isolatoren verloren gegangenen Strom verbrannt.

In anderen Fällen bemerkt man Durchschlagsstellen im oberen Teile der Stütze dicht unter dem Gewinde, trotzdem die äussere Oberfläche und das Innere der Stütze fast keinerlei Verkohlungen zeigen. Der verbrannte Teil muss dann der Punkt des höchsten Widerstandes der Stütze gewesen sein und der untere Teil ein so guter Leiter, dass er den kleinen Strom, welcher über die Oberfläche des Isolators verloren ging, ohne besondere Wärmewirkung in diesem Teile der Stütze durchfliessen liess. Die verminderte Isolation der Glocke war zweifellos durch Staub und Nebel hervorgerufen,

1) Electrical Review, 28. März 1903, S. 445—447.

während der obere Teil der Stütze, der durch den Isolator besser gegen Nebel und Schmutz geschützt war, infolgedessen einen höheren Oberflächenwiderstand hatte.

Zeigen sich saftige Teile im Holze der Stützen, so hat man bemerkt, dass diese weniger, oder überhaupt gar nicht vom Strom beeinflusst werden.

Eine andere Erscheinung an hölzernen Stützen bei Hochspannungsleitungen ist die, dass sich die Stützengewinde „auflösen". Sie werden im Betriebe weich und können mit den Fingern weggerieben werden. Dieses weiche Holz hat einen sauren Geschmack und ähnelt breiig aufgelöstem Holze. Es sei bemerkt, dass diese Erscheinung nicht etwa von dem Durchbrennen irgend eines Teiles der Stütze begleitet zu sein braucht, vielmehr ist dies eine Folge der Vermorschung. Man ersieht hieraus, dass nur die Verwendung eiserner Stützen mit modernen der Spannung angepassten Isolatoren eine genügende Sicherheit bietet. In der That sieht man dies auch in Amerika mehr und mehr ein und lässt die hölzernen Stützen fallen. Hoffentlich machen wir uns diese Erfahrungen zu Nutze und beginnen nicht mit den gleichen zwecklosen Versuchen. An und für sich haben wir es auch gar nicht nötig, denn unser Isolatorenmaterial ist ganz vorzüglich.

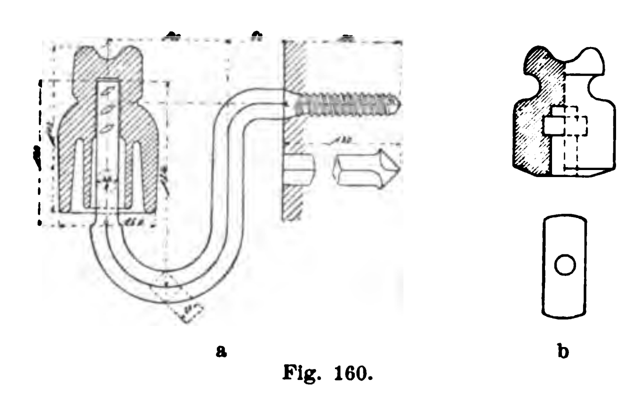


Fig. 160.

94. Befestigung der Isolatoren auf den Stützen. Die Befestigung der Isolatoren auf den gebogenen Stützen muss derart erfolgen, dass eine durch die Befestigungsschraube gezogene Mittellinie den Isolator in der Mitte der Befestigungsstelle trifft (Fig. 160a); nur wenn dies der Fall ist, wird ein Drehmoment durch den vom Drahte ausgeübten Zug, wodurch der Isolator schräg gestellt werden würde, vermieden.

Als Befestigungsmittel der Isolatoren auf den Stützen werden verwendet:

1. Bleiweiss oder Bleiglätte mit Glyzerin,
2. Gips,
3. geschmolzener Schwefel,
4. Hanf mit etwas Teer, Mennige oder Leinöl.

Das zuerst genannte Material bindet sicher und vermindert die Isolation nicht, ist jedoch wegen seiner Giftigkeit mit Vorsicht zu verarbeiten.

Gips ist nicht vorteilhaft zu verwenden, da er hygroskopisch ist und leicht zum Abbröckeln neigt. Um ein zu schnelles Erstarren des Gipses zu verhindern, kann der Brei mit zerriebener Malvenblüte verrührt werden. Im Winter gefriert öfter die im Gips enthaltene Feuchtigkeit und bewirkt ein Zerspringen des Isolators.

Schwefel wird heute weniger verwendet wie früher, da dieser häufig die Isolatoren auseinandertreibt. Die Ursache liegt in der Bildung von Schwefeleisen, welches sein Volumen vergrössert bei der Berührung des Schwefels mit der eisernen Stütze. Werden die Isolatorenstützen jedoch vor dem Einschwefeln mehrere Male mit Asphaltlack gestrichen, so dass der Schwefel mit dem Eisen nicht in Berührung kommt, so wird die Bildung von Schwefeleisen verhindert und die Isolatoren platzen nicht. Ein Zusatz von Cement zum Schwefel im Verhältnis von 1:4 leistet gute Dienste und bindet schnell. — Das unter der Bezeichnung Metallcement in den Handel gebrachte Gemisch hat im wesentlichen diese Zusammensetzung.

Die Befestigung mittels Hanf wird bei der Telegraphen-Verwaltung ausschliesslich vorgenommen, während bei Starkstromleitungen diese Art nicht immer als sicher genug betrachtet wird, trotzdem eine eventuelle Auswechselung derart befestigter Glocken bedeutend schneller von statten geht, als wenn dieselben aufgekittet werden. Die Isolatoren werden mit Hanf und Teer, oder mit Hanf und Mennige, aber auch mit Hanf und Wasser einfach aufgedreht.

Das Befestigungsmaterial soll nur die für die Aufnahme der Stütze bestimmte Höhlung des Isolators ausfüllen, da anderenfalls durch das hervorstehende Material der Isolationswert der Glocke wesentlich vermindert wird.

95. Lösbare Befestigungen.

Die Siemens-Schuckert-Werke lassen die Isolatoren mit genauen Gewinden herstellen, der Bolzen wird in den Isolator eingesetzt und mit einer Metallmasse umgossen, worauf man imstande ist, den Isolator auf- und abzuschrauben.

Ferner werden von Schuckert auch Isolatoren zur lösbaren Befestigung mit einer schlitzförmigen Querdurchbohrung versehen, in welche ein Metallstück mit Gewinde eingeschoben wird (Fig. 160 b). In dieses wird die am oberen Teil mit Gewinde versehene Stütze eingeschraubt und so die Befestigung des Isolators auf der Unterlage ermöglicht.

Das Aufsetzen der Glocke auf die Stütze erfolgt vor der Befestigung der letzteren auf der Tragkonstruktion. Die Eisenstütze soll durch einen Anstrich von Leinölfirnis oder durch galvanische Verzinkung gegen Verrostung geschützt sein.

Das Leitungsmaterial für Freileitungen.

96. Isolierte Leitungen bis 250 Volt.

Für Spannungen bis 250 Volt ist es gestattet, isolierte Leitungen zu verwenden. Da es indessen eine Isolierung,[1]) welche allen Witterungseinflüssen widersteht, nicht giebt, so wird durch isolierte Leitungen nur für kurze Zeit der beabsichtigte Schutz erzielt. Die grössere Fläche der isolierten Leitungen bedingt eine grössere Schnee- und Windbelastung. Sie werden indessen dann verwendet,[2]) wenn sie Schwachstromleitungen kreuzen, oder wenn die Freileitungen gegen unmittelbare Berührung geschützt werden sollen.

97. Hochspannungsleitungen.

Als Hochspannungsleitungen, das sind also nach den vom 1. Januar 1904 gültigen Sicherheitsvorschriften alle Leitungen, deren Spannung gegen

1) Näheres vgl. Weber, Erläuterungen, 6. Aufl., S. 86, Anm. 3.

2) Vgl. Hackethaldraht, Hdb. VI, 1, S. 158 und Hdb. VI, 2, Schutz gegen Telephonstörungen.

Erde 250 Volt überschreitet, müssen blanke Leitungen [1]) Verwendung finden. Es können jedoch Fälle eintreten, in denen eine Umhüllung des blanken Drahtes erwünscht ist, und zwar, wenn ätzende Dünste die Lebensdauer blanker Leitungen beeinträchtigen sollten. Für solche Fälle ist ein schützender Anstrich gestattet, der aber nicht als Isolierung aufzufassen ist. Es dürfte nun allerdings ungemein schwierig sein, einen allen Anforderungen genügenden Anstrich zu finden. Die sonst im allgemeinen für derartige Zwecke verwendeten säurefesten Emaillefarben sind für den vorliegenden Zweck wenig geeignet, da sie wegen der ständigen Bewegungen des Drahtes abbröckeln. Eher dürften hier die mit einem mit Mennige oder Bleiweiss unter Leinölzusatz getränkten Fasergespinst umhüllten Leitungen in Frage kommen; sie müssen aber wie blanke Leitungen behandelt werden.

98. Metallquerschnitt für Freileitungen.

Der geringste zulässige Metallquerschnitt für Niederspannungsleitungen beträgt 6 mm² und für Hochspannungsleitungen 10 mm². Für die letzteren ist aber als Grundlage die Festigkeit [2]) des hartgezogenen Kupferdrahtes gewählt worden, so dass der Mindestquerschnitt weicher Kupfersorten entsprechend grösser gewählt werden muss.[3]) Dasselbe gilt auch für alle anderen Metalle, deren Zugfestigkeit geringer ist als die des hartgezogenen Kupfers. Für die Wahl der Minimalquerschnitte war nicht allein die unbedingt erforderliche Widerstandsfähigkeit gegen Atmosphärilien, sondern auch eine gewisse Sichtbarkeit massgebend.[4])

99. Leitungen aus Kupfer.

Mit verschwindend geringen Ausnahmen wird Elektrolytkupfer für Freileitungen verwendet; es kann aber auch, wenn besondere Festigkeitsrücksichten es wünschenswert erscheinen lassen, Kupfer verwendet werden, welches den auf S. 11 des ersten Teiles dieses Bandes wiedergegebenen Normalien nicht entspricht. Insbesondere wird dies in solchen Gegenden der Fall sein, wo in der Regel mit grossen Schnee- und Eisbelastungen zu rechnen ist, oder wenn grosse Spannweiten zu überbrücken sind. Durch die Erhöhung der Festigkeit leidet allerdings auch die Leitfähigkeit des Materials. Jedoch ist eine höhere Strombelastung wie nach Tabelle No. 16 (Hdb. VI, 1, S. 24) für Freileitungen gestattet, da bei diesen die Gefahr einer Entzündung brennbarer Stoffe bei weitem nicht so gross ist, wie bei Leitungen in der Installation von Innenräumen. Ausserdem werden sie im Freien bei weitem besser gekühlt, so dass die an anderer Stelle erwähnte Temperaturzunahme bei Freileitungen nicht in gleichem Masse auftritt. Allerdings werden die Querschnitte von Freileitungen, insbesondere diejenigen, welche unter hohen Spannungen arbeiten, selten die zulässige Strombelastung zu tragen haben, da unter Berücksichtigung eines möglichst geringen Verlustes in den Leitungen die feuersicheren Querschnitte meistens weit unter dem Thatsächlichen der verlegten Leitungen liegen.

100. Leitungen aus Aluminium.

Aluminium [5]) hat bisher lange nicht die Verwendung gefunden, die man infolge seiner Leitfähigkeit und seines billigen Preises erwartet hatte. Es leidet zu sehr unter den alkalischen Verunreinigungen der Luft, obschon die sich bildende Oxydschicht den ferneren Oxydationsprozess etwas zu erschweren

---

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 10 u. ff. und 156.
2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 3.
3) Hierzu vgl. Weber, Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften, 6. Aufl., S. 42, Anm. 8.
4) ETZ 1902, S. 698, Frage 9.
5) Näheres siehe Hdb. VI, 1, S. 14 u. ff.

scheint. Kupferdrähte, besonders wenn sie stark gespannt sind, schwingen bei starkem Sturm sehr. Die Erschütterungen übertragen sich auf die Gestänge. Bei der Verwendung von Aluminium treten diese Übelstände nicht auf, dagegen ist die geringe Dehnbarkeit dieser Leitungen Ursache bleibender Formveränderungen, die im Winter zu Brüchen führen können. Es muss daher ein grösserer Durchhang, dementsprechend aber auch grössere Abstände zwischen den einzelnen Leitungen gewählt werden. Die Folge sind weiter ausladende Gestänge. Die hierdurch entstehenden grösseren Kosten machen einen Teil des bei Verwendung von Aluminium entstehenden Vorteils wieder wett.

101. Leitungen aus Eisen.

Eisen[1]) wird selten verwendet, da seine Leitfähigkeit zu gering ist. Es findet daher meistens nur dann Verwendung, wenn beabsichtigt wird, wie dies z. B. bei Bogenlampen-Stromkreisen häufig der Fall sein wird, einen gewissen Widerstand einzuschalten.

Die Isolatoren.

102. Geschichtliches.

Alle Freileitungen werden auf Isolatoren verlegt, die je nach der Spannung, für welche sie bestimmt sind, ausgebildet werden. Es war natürlich, dass die bereits seit längeren Zeiten im Telegraphenbau erprobten Isolatoren in erster Linie beim Bau von Freileitungen für Starkstromzwecke Verwendung fanden. Die ursprünglichste Form[2]) ist in Fig. 161 gekennzeichnet. Im Jahre 1857 wurde von Borggreve die in Fig. 162 wiedergegebene Form verwendet, die sich insofern vorteilhaft gegen die vorher erwähnte Art auszeichnet, als sie mit zwei Abtropfmänteln versehen ist. Infolge der viereckigen Ausbildung des zur Aufnahme des Befestigungsbolzens dienenden Loches traten aber innerhalb des Materials so grosse Spannungen auf, dass sehr viel Bruch zu verzeichnen war, wodurch das Modell wertlos wurde.

Infolge dieses Misserfolges wurde vom preussischen Handelsministerium eine Kommission eingesetzt,[3]) welche die in Fig. 163 wiedergegebene Form empfahl; diese als „Kommissionskopf" bezeichnete Konstruktion bestand aus weissem Glase, dessen brennglasartige Wirkung bei direktem Sonnenlicht eine starke Ausdehnung der eisernen Bolzen hervorrief, wodurch die Isolatoren zersprengt wurden. Durch die Form des Isolators wurde beabsichtigt, dem Strom einen möglichst weiten Weg vom Draht zur Stütze zu geben. Im Jahre 1858 gab der preussische General-Telegraphendirektor von Chauvin die in Fig. 164 wiedergegebene Doppelglocke an, deren Wert hauptsächlich darin besteht, dass die Schicht von Feuchtigkeit, die sich an der Oberfläche des Isolators niederschlägt, keinen Zusammenhang behält,[4]) und infolgedessen keine leitende Brücke zur Erde bildet.

103. Isolatoren mit mehreren Mänteln

Aus dem Vorstehenden ist bereits ersichtlich, dass die konstruktive Durchbildung eines Isolators hauptsächlich von dem Gesichtspunkt aus vorgenommen werden muss, dass dem Strom der Weg nach der Stütze und über

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 2, 13 u. ff. und 156.

2) Ausführliches siehe Archiv für Post und Telegraphie, 1892, Telegraphentechnik der Praxis.

3) Hdb. XII, S. 619: Der Vollständigkeit dieses Bandes wegen sind die in jenem Band reproduzierten Isolatoren hier nochmals wiedergegeben.

4) Ludewig, Bau von Telegraphenlinien, 1870; Zetsche, Handbuch der Telegraphie, Bd. III.

diese zur Erde möglichst abgeschnitten wird. Bei den ersten oben erwähnten Typen war dieser Weg selbst für die geringen beim Telegraphieren auftretenden Ströme zu gering.

Solange ein Isolator in trockener Luft verwendet wird und die Spannung zwischen Draht und Stütze nicht allzu hohe Werte annimmt, genügt die Oberflächenisolation, um Nebenentladungen zu verhindern. Wird der Isolator dagegen feucht, wodurch natürlich die Oberflächenisolation wesentlich vermindert wird, wobei sich gleichzeitig aber auch die Leitungsfähigkeit der mit Wasserdämpfen erfüllten Atmosphäre erhöht, so treten Verluste auf, welche mit Randentladungen bezeichnet werden. Diese werden wesentlich dadurch unterstützt, dass Regentropfen nicht dem Gesetz der Schwere folgend vom unteren Rande des Mantels abtropfen, sondern in bestimmten Kurven der Stütze zustreben und so der höheren Spannung einen Weg zur Erde

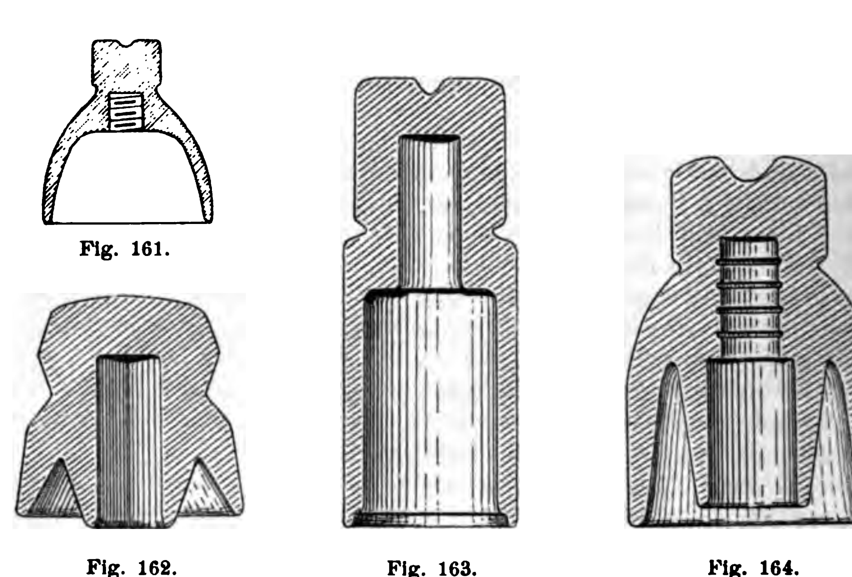


Fig. 161.

Fig. 162. Fig. 163. Fig. 164.

bieten. Zu diesen Entladungen liegt der Isolator im Nebenschluss und seine Isolierfähigkeit wird nahezu aufgehoben. Als Spannung der Randentladung wird nach Friese diejenige verstanden, bei der zwischen Draht und Stütze unter strömenden Regen die Spannung gerade überzuschlagen beginnt.

Um die Oberflächenisolation möglichst hoch zu bekommen, ist es erforderlich, dem Isolator eine solche Gestalt zu geben, dass die Oberflächenleitung möglichst gering wird, so dass dem Strom, welcher vom Draht zur Erde entweichen will, ein sehr grosser Stromweg entgegensteht. Infolgedessen sind aus dem einfachen Glockenisolator solche geworden, die statt eines einfachen Mantels deren mehrere besitzen, und es entstanden die in Fig. 165 wiedergegebenen Typen, die von Schomburg & Söhne, Berlin, hergestellt bei einer Höhe von 130 mm und einem äusseren Durchmesser von 110 mm für Spannungen bis 10000 Volt genügen. Indessen ist auch bei diesen wegen des geringen Abstandes der unteren Mantelränder die Verwendbarkeit für noch höhere Spannungen ausgeschlossen, da bei ihnen starke Randentladungen auftreten. Um dies zu vermeiden, wurden von der Porzellanfabrik Hermsdorf-Klosterlausnitz Isolatoren konstruiert (Fig. 166 a u. b),

deren Mäntel weit auseinanderliegen, wodurch der eine Mantel stets die Innenfläche des darüberliegenden gegen Regen schützt und so die Isolierfähigkeit des Isolators erhöht wird. Durch das schirmartige Ausbreiten der Mäntel bei diesem Isolator und das hierdurch bedingte weitere Abrücken

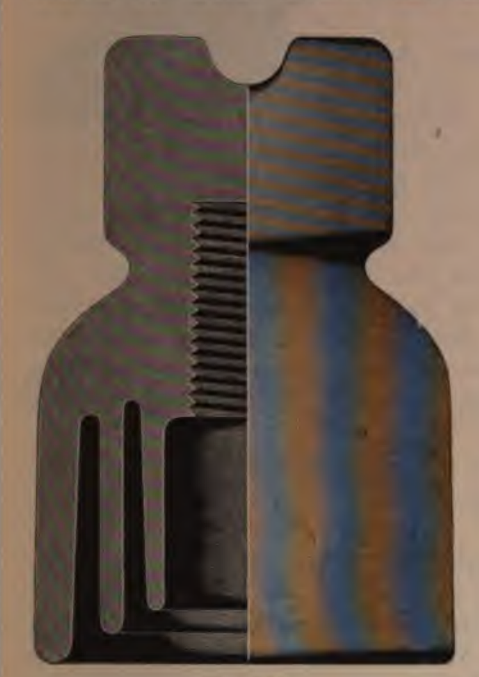
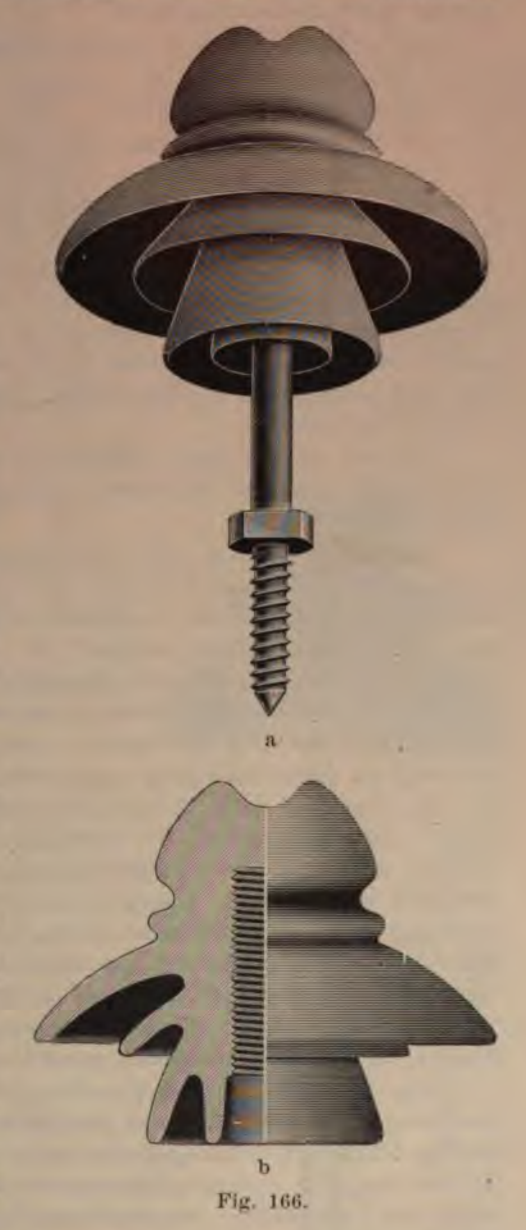


Fig. 165.



a

b

Fig. 166.

der Mantelränder von der Stütze verminderten sich die Randentladungen, sie werden aufgehoben durch das Hinzufügen eines in den Entladeweg vorgeschobenen weiteren Mantels. Ein weiterer Vorteil dieser Isolatoren ist der, dass sie einen grossen Schutz gegen Insekten bieten, die gern in den engen Hohlräumen der früher üblichen Isolatoren eindrangen und durch ihre Gespinste und Sekrete die Isolationswirkung beinahe aufhoben. Von wesentlicher Bedeutung ist dieser Umstand für die Verwendung der Isolatoren in tropischen Ländern.

Bei den soeben beschriebenen Isolatoren sind die Hohlräume vom Tageslicht hell beleuchtet und auch so weit und geräumig, dass die Insekten sie meiden und auch die Anhäufung von Schmutz im wesentlichen verhindert wird. Eine andere weniger günstige amerikanische Form zeigt Fig. 167.

Fig. 168 giebt den viel verwendeten Shakleisolator wieder. — Für extreme Hochspannungen genügten die vorstehend beschriebenen Isolatoren nicht

immer. Die Masse und die Spannungen im Material werden zu gross und daher die Herstellung schwierig.

Man hat daher versucht, die Isolatoren aus mehreren Teilen herzustellen, von denen jeder für sich angefertigt und glasiert wird. Die einzelnen Teile werden dann zusammengekittet.

104. Geteilte Hochspannungsisolatoren.

Fig. 169 a zeigt einen solchen Isolator, der bei der Gleichstrom-Hochspannungsübertragung Maurice-Lausanne bei einer Spannung von 22000 Volt Gleichstrom Verwendung findet. Eine ähnliche Type ist auf der Strecke Paderno-Mailand im Gebrauch. Der innere einfache Mantel ist völlig glasiert, der äussere ist mit drei Glocken versehen. Die Befestigung des inneren Mantels auf den verzinkten Eisenstützen erfolgt ebenso wie die des äusseren Mantels auf dem inneren mit einem Gemisch von Glycerin und Bleiglätte. Die Anordnung der Leitungen auf dieser Strecke ist aus Fig. 169 b zu ersehen; die hier gezeichneten Fangbügel finden jedoch nur an Strassen und Wegübergängen Verwendung. Da bei Gleichstrom auf die Höhe des Selbstinduktionskoeffizienten keine Rücksicht genommen zu werden braucht, sind die Leiter ziemlich weit auseinander gelegt worden, und zwar in 80 cm Höhen- und 100 cm direkter Differenz.

Für die 55 km lange Strecke sind 1600 imprägnierte und in Cement eingesetzte Holzmaste verwendet, durchschnittlich kommt also auf je 35 m ein Mast.

105. Glasisolatoren.

In Amerika werden sehr viele Glasisolatoren verwendet, gegen die jedoch eingewendet wurde, dass es nur schwer möglich sei, gut gekühlte Ware zu erhalten, die ausreichende Festigkeit besitzt. Demgegenüber betont White,[1]) dass es überhaupt nicht möglich sei, Glasisolatoren zu durchschlagen und daher die Grenze ihrer Verwendbarkeit bei der Spannung liege, welche ausreiche, um den Isolator herum nach der Stütze überzuschlagen. Um hier dem Funken den Weg zu verlegen, werden die innersten Mäntel des Isolators tief über die Stütze heruntergezogen. Der Einwand, dass Glas hygroskopischer ist als Porzellan und dadurch ein schnelles Trocknen der Glocken nach Regen nicht möglich sei, ist übertrieben, ebenso wie der Vorschlag, in die Glocke eine vom Strom durchflossene Spule einzubauen, um den Isolator schneller zu trocknen. Dagegen ist durch die geringe Festigkeit des Glases bedingt, dass die Oberfläche nicht glatt bleibt, sondern rauh wird. Hierdurch ist die Ansammlung von Schmutz u. s. w. leichter möglich und eine geringere Oberflächenisolation die Folge. Auf die Unzulänglichkeit des Glases infolge seiner Empfindlichkeit gegen Temperaturschwankungen ist bereits auf S. 153 aufmerksam gemacht.

The Hemingray Glass Company in Covington, Ky., hat verschiedene Isolatorentypen aus Glas auf den Markt gebracht, von denen zwei Typen in Fig. 170 a u. b wiedergegeben sind. Die erstere, von der Missouri River Power Company verwendet, widersteht Spannungen bis 55000 Volt und besteht aus zwei Teilen, die beide aus Glas sind. Der Isolator ist auf einem Schaft aus weisser Eiche befestigt und zeichnet sich dadurch aus, dass in eigenartiger Weise zwei Mäntel oberhalb der allgemein üblichen angeordnet sind. Bei anderen Typen der gleichen Firma ist der Rand der unteren

---

1) Conv. of the Nat. El. Light Ass. Niag. Falls, 1897, June. — Herzog & Feldmann, Beleuchtung, 1901, S. 153.



Fig. 168.



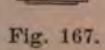
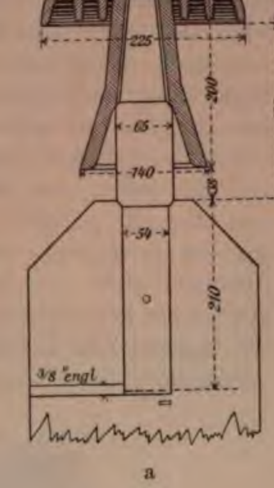
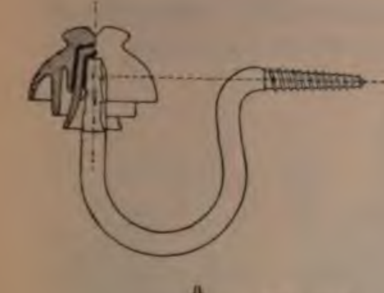


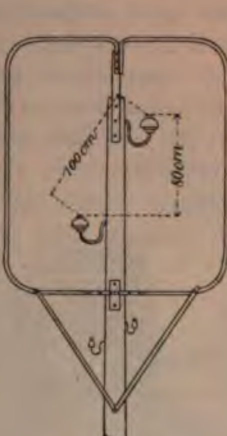
Fig. 167.



a



a



b

Fig. 169.



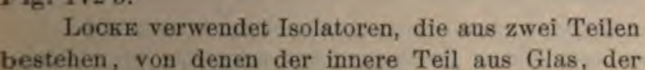
b

Fig. 170.

Schirme nicht glatt, sondern mit kleinen Zacken versehen, um ein schnelleres Abtropfen des Regenwassers zu ermöglichen.

Bei dem in Fig. 171 gekennzeichneten Glasisolator ist am äusseren Schirm durch einen aufstrebenden Wulst eine Rinne gebildet, welche an einer Seite zu einer Traufe ausgebildet ist. Der Isolator wird nun so angebracht, dass das durch diese abfliessende Wasser nie auf die Eisenkonstruktion fallen kann. Hierdurch soll einmal vermieden werden, dass das Wasser von der Stütze in das Innere der Glocke zurückspritzt, ferner sollen etwa am Isolator sich bildende Eiszapfen an den Streben keine Stütze finden. Fig. 172 a zeigt einen Isolator für 60 000 Volt der Kraftübertragungsanlage von Guanajuato-Mexiko,[1]) der aus vier Teilen zusammengesetzt ist. Er ist auf einer hohlen Stütze befestigt. Seine Anordnung auf dem Gestänge zeigt Fig. 172 b.

Fig. 171.



Locke verwendet Isolatoren, die aus zwei Teilen bestehen, von denen der innere Teil aus Glas, der äussere aus Porzellan besteht, letzteres, weil Porzellan den Unbilden der

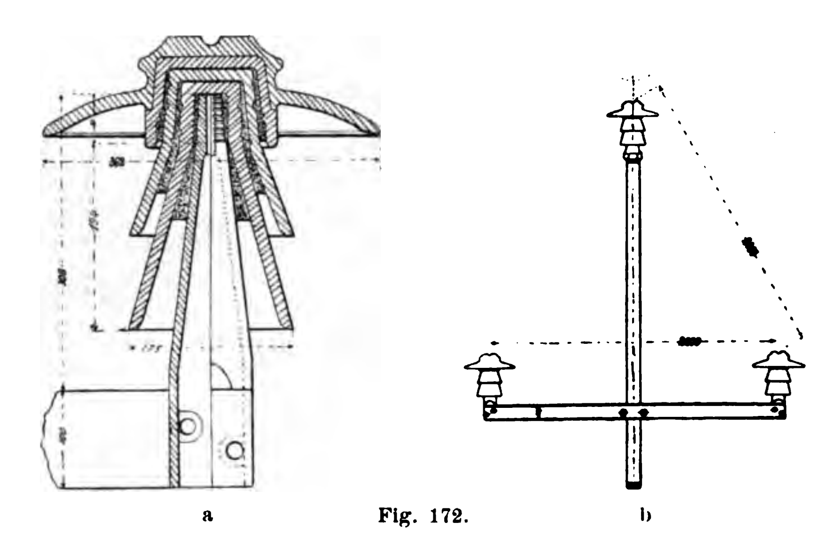
1) Electrical World and Engineer, New York 1904, S. 286.

Witterung besser widersteht als Glas, dieses aber höheren Widerstand gegen Durchschlagen bietet.

Die Missouri River Power Co. besitzt in Kalifornien bei Black Canon am Missouri eine Wasserkraftanlage von etwa 10000 PS, welche früher Zweiphasenstrom von 12000 Volt und jetzt auch Drehstrom von 50000 Volt liefert.

Nach der Zeitschrift „The Electrical Times“ besteht die 104 km lange Fernleitung nach Butte, mit 50000 Volt Betriebsspannung, aus zwei völlig voneinander getrennten, auf zwei Reihen von 10 bis 30 m hohen Zedernmasten verlegten Leitungen. Die verwendeten Glasisolatoren (Fig. 173) von 150 mm Höhe und 230 mm Durchmesser wurden mit 100000 Volt geprüft und sind auf paraffinierte Eichenholzstifte gesetzt. Einer der Isolatoren sitzt auf der Mastspitze, die beiden anderen auf einem Auslegerarm in solchem Abstand, dass die drei Leiter die Eckpunkte eines gleichseitigen Dreiecks von je 1·8 m Seitenhöhe bestimmen.

100. Ölisolatoren. Anstatt den Stromübergang durch eine möglichst grosse Oberfläche zu vermindern, wurde vielfach versucht, eine Ölschicht derart anzubringen, dass



a Fig. 172. b

diese selbst einen Teil der isolierenden Oberfläche des Isolators bildet. Bereits im Jahre 1869 nahmen LENOIR & PRUDHOMME[1]) ein Patent auf die Verwendung von Öl für diese Zwecke, JOHNSON & PHILLIPS verwendeten sie jedoch erst 1876 in mehreren Ausführungsformen. Indessen zeigen diese Ölisolatoren mannigfache Mängel, die ihre Einbürgerung verhinderten. Leichte Ölsorten wurden, da sich Wasser in den für das Öl bestimmten Hohlräumen ansammelte, von diesem herausgedrängt, andere Öle verharzten, die grossen Hohlräume gaben den Insekten gute Schlupfwinkel. Da der Isolator naturgemäss nur dann eine volle Isolierfähigkeit besitzt, wenn sich die Ölschicht in Ordnung befand, so mussten die Isolatoren häufig nachgesehen werden, wodurch sich ihr Verwendungsgebiet auch nicht erweitern konnte. Ausserdem geriet beim Durchschlagen eines derartigen Isolators das Öl mitunter in Brand, der dann auf die Masten übergriff.

1) HERZOG & FELDMANN, Elektrische Beleuchtung, 1901, S. 150.

Die einfachste Form dieser Isolatoren wird in Fig. 174 nach einem von Schomburg & Söhne hergestellten Modell wiedergegeben. Es besteht aus einer Glocke, deren Rand nach innen aufgebogen ist, wodurch ein Hohlraum zur Aufnahme des Öles geschaffen wird.

Für die Kraftübertragung von Lauffen nach Frankfurt im Jahre 1891 wurden Isolatoren verwendet (Fig. 175), deren Schaft mit mehreren Schalen zur Aufnahme des Öles versehen war. Bemerkenswert ist bei dieser Konstruktion, dass sie aus zwei Teilen hergestellt wurde, eine Anordnung, die von grossem Vorteil, wie wir bei Besprechung der Hochspannungsisolatoren sahen, im vorliegenden Falle aber nur getroffen wurde, weil sonst die Herstellung des Isolators nicht möglich gewesen wäre. Der in Fig. 176 abgebildete Ölisolator ist ebenfalls aus zwei Teilen zusammengesetzt, aus einem rinnenförmigen Teil zur Aufnahme des Öles und dem eigentlichen Isolator, dessen innerer Mantel bis zu einer gewissen Tiefe in das Öl eintaucht. Für Hochspannung soll der neuerdings bekannt gewordene Hochspannungs-Öl-



Fig. 173. Fig. 174. Fig. 175.

isolator (Fig. 177) dienen, dessen innerer Teil mit zwei Ölmulden ausgerüstet ist, während der äussere auf den ersteren aufgekittete Teil weit ausladet und so durch seine grössere Oberfläche schon sehr erhebliche Spannungen aushalten kann.[1])

107. Krücken- und Rillen-isolatoren.

Der Glockenisolator kann nur in aufrechter Stellung verwendet werden, so dass das senkrechte Herabführen von Leitungen Schwierigkeiten bietet. Liegt der Draht hierbei am unteren Isolatorende an, so fliesst das Wasser direkt am Draht herab, so dass der Isolationswert der Glocke vermindert wird. Aus diesem Grunde werden in solchen Fällen sogenannte Krückenisolatoren verwendet. Hierdurch waren immer verschiedene Isolatorentypen erforderlich. Um dies zu vermeiden, wurden die in Fig. 178 gekennzeichneten Rillenisolatoren konstruiert, die aber den auf sie gesetzten Erwartungen nicht voll entsprochen haben.[2])

Fig. 179 a zeigt einen Krückenisolator, der an solchen Stellen Verwendung findet, wo die Leitungen senkrecht geführt werden sollen. Die abwärts gehende Leitung wird an der Krücke festgebunden, so dass sie den unteren Rand des Isolators nicht berührt.

1) Electrical World, Jan. 1897, S. 33.
2) Herzog & Feldmann, Beleuchtung, 1901, S. 153.

Nach einer Anordnung der Siemens-Schuckert-Werke wird um die Krücke eine Schelle gelegt, an der dann Apparate oder Leitungsschienen befestigt werden können (Fig. 179 b).

Als Spezialtype für die Befestigung von den beweglichen Leitungen,

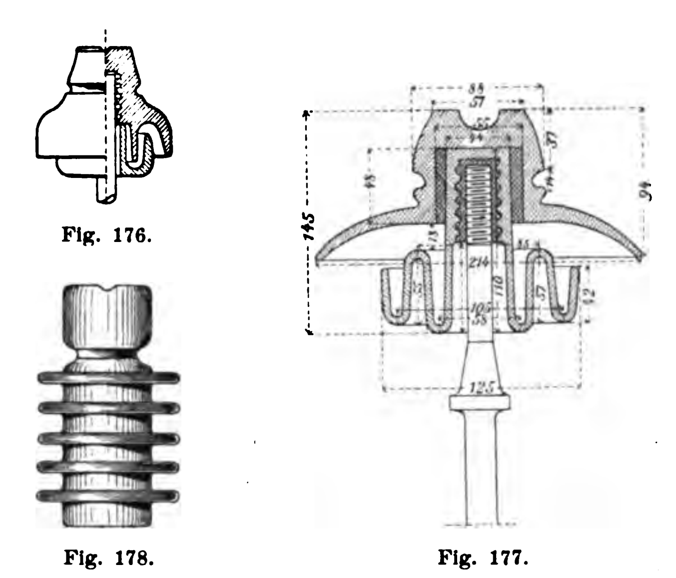


Fig. 176. Fig. 178. Fig. 177.

welche Bogenlampen den Strom zuführen, sei Fig. 180 gezeigt. Auf dem Isolatorkopf ist ein Gussstück festgekittet, welches eine trompetenförmige Öffnung hat. Diese hat den Zweck, dass das hängende Seil sich bewegen kann, ohne sich zu scheuern.



Fig. 179. Fig. 180.

Das zur Herstellung von Isolatoren verwendete Porzellan und seine Fabrikation.

108. Allgemeines über die Porzellanisolatoren. Ein wesentlicher Faktor für die Güte der Porzellanisolatoren ist die Zusammensetzung des Materials und seine technische Behandlung, damit es die ausserordentlich grosse Hitze beim Brennen so verträgt, dass Formveränderungen, welche nachteilig wirken, nicht auftreten können und vor allen Dingen Risse vermieden werden.

Ferner eignet sich auch nicht jede Porzellanmasse zur Verarbeitung für Isolatoren. So ist z. B. Amerika arm an Kaolin und die aus amerikanischem

Material hergestellten Isolatoren weichen in ihrer Güte wesentlich von den unsrigen ab, so dass die Amerikaner häufig gezwungen sind, die Isolation einer Freileitung dadurch zu erhöhen, dass sie die Glocken statt auf Eisen auf hartes Holz setzen und ausserdem Glas statt Porzellan verwenden. Zu berücksichtigen ist aber dabei, dass sich nicht alle Holzarten eignen, sondern nur solche, die kein Wasser anziehen und auch dann nur unter gewissen Umständen.[1])

Auch auf die Form und Stärke des Porzellans muss überaus grosse Rücksicht genommen werden, da es bei Verwendung für höhere Spannungen nicht allein genügt, entsprechend der Spannungserhöhung die Wandstärke des Isolators einfach zu erhöhen. Über eine gewisse Grenze hinaus ist es nicht mehr möglich, das Material im Garbrande so zu verglasen, dass es weder Risse noch Hohlräume bekommt, welche die Masse durchsetzen, wodurch ihre Durchschlagsfestigkeit wesentlich herabgesetzt würde. Infolgedessen wird bei der Ausführung grösserer Isolatoren die Masse häufig unterteilt und die einzelnen Teile dann zusammengebrannt.

109. Porzellan im Vergleiche zu anderen Isoliermaterialien.

Nach Versuchen, welche WATTS[2]) aufstellte, hat es sich als vorteilhaft erwiesen, eine gewisse Type bezw. eine grössere Anzahl von Porzellansorten mit verschiedener Zusammensetzung als Normalporzellane anzunehmen, und durch Vergleich mit diesen die charakteristischen Merkmale der Porzellansorten, welche jetzt im Gebrauch sind, festzustellen. Nach Prof. BINN wird Al_2O_3 (Thonerde) in den Formeln als Einheit genommen. Bei Prüfung von 36 Proben erhielt man das Resultat, dass der Gehalt an RO (Verbindung eines Alkali oder alkalischer Erde mit Sauerstoff) von 0·0467 im japanischen bis 5·43 im alt-englischen Porzellan und von 0·114 in modern belgischer bis 1·84 in modern englischer Ware schwankt, während der Gehalt an SiO_2 (Kieselerde) verhältnismässig konstant blieb. Dann wurde der Normalwert für RO festgestellt und es wurden, da bei den so weit auseinanderliegenden Grenzen die Auswahl der verschiedenen Porzellansorten nicht genügend weit durchgeführt werden konnte, die folgenden drei Normaltypen aufgestellt:

Serie	A	1·00 RO	1·00 Al_2O_3	4·2 SiO_2	Type 6
„	B	0·5 „	1·00 „	4·2 „	„ 9
„	C	0·3 „	1·00 „	4·2 „	„ 12

Die verschiedenen Porzellansubstanzen erhielt man für die Versuche folgendermassen: Die beiden extremen Sorten eines jeden Satzes wurden abgewogen und in nassem Zustande in einer Kugelmühle gemahlen. Die dazwischen liegenden Nummern erhielt man durch Vermengen der extremen Sorten in flüssigem Zustande. Nach gründlichem Mischen wurden sie in Gipsformen gegossen, um nach dem Erhärten das Wasser zu entfernen. Von jeder Porzellansubstanz stellte man nun verschiedene Fabrikate her und unterzog diese einer Prüfung auf ihren elektrischen Widerstand, Zug- und Scherfestigkeit, Absorption und Schwindung. Zur vergleichenden Prüfung hatte man noch folgende Isolationsmaterialien herangezogen: Eine Fensterglasscheibe, eine Glasplatte und eine Platte aus Porzellan und erzielte folgende Resultate:

1) Vgl. S. 149.
2) Nach „Electrical World and Engineer", 15. Nov. 1902.

Porzellan-Probestück, 100 × 100 × 10 mm, eingebettet in Portlandcement, durchschlagen bei 17000 Volt,

Porzellan-Probestück, 100 × 100 × 10 mm, nicht in Cement eingebettet, durchschlagen bei 20250 Volt,

Fensterglasscheibe, 150 × 150 × 3·2 mm, durchschlagen bei 40000 Volt,

Glasierte Porzellanplatte, 150 mm ∅, 3·2 mm stark, durchschlagen bei 49500 Volt.

Eine Glasplatte, 150 × 150 × 6·3 mm, widerstand einer Spannung von 60000 Volt, dann sprang der Lichtbogen um die Platte herum, ohne diese zu durchschlagen.

Aus diesen Resultaten ist festgestellt, dass

1. Portlandcement keinen grösseren Isolationswiderstand hat als eine gleich starke Schicht trockener Luft,
2. Porzellan, wenn es nicht vollkommen verglast ist, kein besonders hohes Isolationsvermögen hat, selbst wenn es vollkommen trocken ist,
3. bei Fensterglas das Isolationsvermögen zwischen demjenigen von halb verglastem und verglastem Porzellan liegt,
4. vollständig verglastes Porzellan, selbst wenn es nur 3·2 mm stark ist, einen so hohen Isolationswiderstand zeigt, wie dieser unter heutigen Verhältnissen erforderlich wird,
5. eine Glasplatte ein besonders hohes Isolationsvermögen besitzt.

Da von einem guten und einwandsfrei hergestellten Isolator der Erfolg einer Fernübertragung nicht zum geringsten Teil abhängt, seine Güte aber wieder durch die Herstellung und Behandlung des Porzellans bedingt ist, seien einige Worte über dieselbe gesagt, wobei wir uns an eine Arbeit von HERZOG und FELDMANN halten.[1])

110. Eigenschaften des Porzellans.

Das Hartfeuer-Isolierporzellan unterscheidet sich wesentlich von dem sogenannten Geschirrporzellan; letzteres ist zu transparent und hat daher keine genügende Isolierfähigkeit. Das Porzellan besteht aus einem im Feuer unschmelzbaren, weissen Thon, der Porzellanerde (Kaolin), wodurch die Formbarkeit möglich ist, und aus zwei im Feuer schmelzbaren Substanzen, dem Quarz und dem Feldspat. Werden diese drei Substanzen in feingemahlenem Zustande einer Hitze, bei welcher Gold schmilzt, ausgesetzt, kommen die Quarz- und Feldspatteilchen innig zusammen. Dabei sind sämtliche ursprünglich vorhandenen Poren ausgefüllt und man erhält ein hartes, klingendes Produkt. Je feuerfester das Kaolin und je grösser der Feldspatgehalt ist, je feiner die Mahlung des Rohmaterials und endlich, je höher die Brenntemperatur ist, desto isolierfähiger ist die Porzellanmasse. Die Glasur ist Kali-Kalk-Thonerde und Glas und besteht gleichfalls aus Kaolin, Quarz,

1) ETZ 1900, S. 905; ferner die Fabrikation des Feldspat-Porzellans von GRIMM (HARTLEBENS chemisch-technische Bibliothek, Bd. 249); KERL, Handbuch der Thonwaarenindustrie, Braunschweig; JAENNICKE, Geschichte der Keramik. — Soeben ist ein von Prof. FRIESE im Auftrag der Porzellanfabrik Hermsdorf-Klosterlausnitz herausgegebenes Buch „Das Porzellan als Isolier- und Konstruktionsmaterial in der Elektrotechnik“ erschienen, welches sehr empfehlenswert ist; es konnte leider für die vorliegende Arbeit nicht mehr benutzt werden, mit Ausnahme der Lieferungsbedingungen auf S. 170.

Feldspat und Kalk. Die beiden letzteren Substanzen sind überwiegend vorhanden. Die Porzellanmasse wird zum Zwecke der Glasierung einem bestimmten Wärmegrade, bei welchem sie gerade erweicht, bei dem aber die Glasurbestandteile gleichzeitig vollständig schmelzen, ausgesetzt. Von Masse und Glasur ist die letztere als vollkommen verschmolzenes, porenfreies Glas die isolierfähigere Materie, ganz abgesehen von den später erwähnten Vorteilen derselben. Unrichtig wäre es aber nun, wenn man, auf die Isolierfähigkeit der Glasur trauend, nunmehr die Porzellanmasse weniger sorgfältig behandelte. In diesem Fall würde jeder kleine Riss in der Glasur die Unbrauchbarkeit des Isolators bedingen.

Der Gehalt an Kaolin muss zum Gehalte an Quarz und Feldspat in einem ganz bestimmten Verhältnis stehen, wenn man einer Porzellanmasse besondere Eigenschaften, z. B. die der Isolierfähigkeit geben will. Es sei auch darauf hingewiesen, dass die in der Natur vorkommenden Rohmaterialien Kaolin, Quarz und Feldspat keinesfalls der chemischen Zusammensetzung entsprechen, welche für die Verwendung zum Porzellan erforderlich ist. Vielmehr ist das geeignete Mittel erst durch die Forschungen von Richters, Aron und Seger festgestellt. Ein zu grosser Quarzgehalt macht die Masse zu wenig, ein zu geringer zu viel plastisch, so dass die Stücke nach dem Brande Wellen, Eindrücke und Wülste zeigen. Ein zu hoher Feldspatgehalt macht die Masse zu flüssig und veranlasst Risse, ein zu niedriger bewirkt Trockenheit — Tinte zerfliesst an der Bruchfläche — und man erreicht nicht die gewünschte Isolierfähigkeit.

Untersuchungen von Porzellanisolatoren[1]) bezüglich des elektrischen Widerstandes ergaben, dass Stücke, die einen grossen Widerstand zeigten, einen hohen Gehalt an Kieselerde und einen mässigen an Thonerde besassen. Es zeigte sich, dass eine merkliche Verbesserung der Eigenschaften mit Zunahme von K_2O und Abnahme von CaO eintritt und man erhielt ein sprödes Porzellan, sobald man nur ausschliesslich K_2O ohne jede Beifügung von CaO verwendete. Man soll also einer Mischung nur wenig CaO hinzufügen, fehlen darf diese Substanz jedoch nicht.

Aus Scherfestigkeitsversuchen ist zu entnehmen, dass K_2O als ausschliessliches Flussmittel dient und selbst ein mässig hoher Gehalt an Thonsubstanz ein sprödes Porzellan liefert. Werden nur $20\,^0/_0$ K_2O durch CaO ersetzt, so bildet das gewonnene Produkt einen zähen und gut glasierten Körper, obschon die Durchsichtigkeit durch Zusetzen von CaO stets herabgesetzt wird, doch ist letzterer Umstand für den vorliegenden Zweck nicht von Wichtigkeit. Bei anderen Versuchen zeigte es sich ferner, dass der Gehalt an Thonerde (Al_2O_3) keinen grossen Einfluss hat, ähnlich wirkt auch der Gehalt von SiO_2 (Kieselerde). Grössere Beimengungen dieser Substanz haben in bezug auf Scherfestigkeit bessere Resultate gezeitigt als Proben mit geringerem SiO_2-Gehalt.

Es wurde beobachtet, dass man auch nicht die gleiche Glasur bei verschiedenen Proben erhielt, wenn CaO durch eine entsprechende Menge K_2O ersetzt wurde. Ein mässig hoher Gehalt von SiO_2 und ein Zusatz von Al_2O_3 gab ein gutes und festes Porzellan, doch darf man nicht mehr als 1 Al_2O_3 und 6·2 SiO_2 verwenden. Mit einem Zusatz unter 0·8 Al_2O_3 und 6·2 SiO_2 war infolge der geringen Verglasung keine Probe zuverlässig. Der Gehalt an RO

1) Electrical World and Engineer, 15. Nov. 1902.

(Alkali), welcher in bezug auf Zugfestigkeit befriedigende Resultate ergab, schwankte zwischen

$$40\,\%\ K_2O \text{ und } 80\,\%\ K_2O,$$
$$60\,\%\ CaO\ \ „\ \ 20\,\%\ CaO.$$

Im übrigen ist die Festigkeit des Porzellans sehr gross; es widersteht einem

Druck von ca. 4500 kg/cm^2,
Zug „ „ 1700 kg/cm^2.

Das Kaolin hat die Eigenschaft, beim Trocknen und Brennen sein Volumen und Gewicht zu verringern, man muss also bei der Fabrikation mit einer gewissen Schwindung rechnen, die dadurch festgestellt wird, dass man aus der Masse verschiedene Gegenstände formt, diese brennt und erst dann die Dimensionen genau berechnet, um den Schwindungsgrad festzusetzen. Eine gewisse Abweichung ist daher auch von den Interessenten immer zugelassen. Die meisten Telegraphenbehörden lassen z. B. bei Isolatoren eine Abweichung von 3—5 % von den vorgeschriebenen Dimensionen zu.

Bezüglich der Schwindung sei noch erwähnt, dass drei Faktoren dieselbe beeinflussen: 1. Die Menge der verwendeten Thonmasse; 2. die Verschiedenheit in bezug auf die Art des benutzten Flussmittels; 3. der Gehalt an Kieselerde. Den Grad des Schwindens kann man daher fast jedem besonderen Falle anpassen.

Jedoch ist die Schwindung nicht ganz sicher anzugeben, ist auch von der Bearbeitungsmethode abhängig. Sie beträgt ungefähr 14—18 %.

Ein ideales Porzellan für elektrische Zwecke kann enthalten: 50—80 % seines Gehaltes an RO (Alkali) in Form von K_2O und den Rest als CaO, ferner 0·8 bis 1·0 Al_2O_3 und 4·2 bis 6·2 SiO_2. Als Formel zusammengefasst erhält man als Grenze der Zusammensetzung:

$$\left.\begin{matrix} 0{\cdot}5 \text{ bis } 0{\cdot}8\ K_2O \\ 0{\cdot}5\ \ „\ \ 0{\cdot}2\ CaO \end{matrix}\right\}\ 0{\cdot}8 \text{ bis } 1{\cdot}0\ Al_2O_3\ \Big\{\ 4{\cdot}2 \text{ bis } 6{\cdot}2\ SiO_2.$$

Engere Grenzen müsste man noch ziehen, wenn man bezüglich des Produktes besondere Anforderungen stellt, welche sich z. B. auf spezielle Härte oder grössere Durchsichtigkeit erstrecken. Indessen würde jedes beliebige, innerhalb der aufgestellten Grenzen angefertigte Porzellan unter sonst gleichen Verhältnissen demjenigen Porzellan mindestens gleichwertig, wenn nicht gar überlegen sein, welches bei dem jetzt im Handel erhältlichen elektrischen Isolator Verwendung findet.

111. Fabrikation des Porzellans für elektrotechnische Zwecke.

Auf die Zusammensetzung der Glasur muss auch besondere Sorgfalt verwendet werden. Dieselbe muss vor allem hart, weiss und von solcher Zusammensetzung sein, dass sie allen Witterungseinflüssen widersteht. Die Glasur muss einen solchen Schmelzpunkt haben, dass sie zur selben Zeit vollkommen schmilzt, wo die Masse erweicht und daher eine innige Verkittung ihrer Bestandteile herbeigeführt wird. Ist sie zu schwerflüssig, dann ist die Masse zu früh gargebrannt, ist sie zu leichtflüssig, dann rinnt sie wiederum zu schnell ab. Die Glasur muss aber auch den gleichen Ausdehnungskoeffizienten haben wie die Porzellanmasse, da sonst bei Erwärmung und Abkühlung infolge ungleicher Spannungsverhältnisse Risse entstehen. Man bereitet die Glasuren meist aus Quarz, Feldspat, Kaolin und Kalk, doch werden auch gemahlene Porzellanscherben, Dolomit u. s. w. verwendet. Farbige Glasuren enthalten Zusätze färbender Oxyde, als Kobalt (blau), Chrom (grün), Eisenoxyd (braun),

Mangan (gelb), Uran (schwarz) u. s. w. Die Ansicht, dass farbige Glasuren aus Metalloxyden den Strom leiten, ist durchaus irrig, denn diese Oxyde bilden mit der Kieselsäure Silikate (Gläser), welche vollkommen nichtleitend sind.

Es sei noch zu erwähnen, dass Isolatoren, welche in weisser Farbe hergestellt werden, häufig böswilligerweise als Zielscheibe für Steinwürfe und Flintenschüsse dienen und dass man dem dadurch begegnen kann, dass man eine unauffällige Farbe, möglichst braun, für die Isolatoren wählt. Dem stehen jedoch auch wieder ganz wesentliche Schwierigkeiten dadurch gegenüber, dass bei der Ausfuhr der Isolatoren in fremde Länder nur der weisse Isolator zollfrei eingeführt werden darf, hingegen der bunte als ein Kunstprodukt angesehen wird und infolgedessen hohen Zöllen unterliegt.

Die häufig auftretenden Fehler in den Glasuren, z. B. kleine schwarze Punkte, mattes, der Eierschale ähnliches Aussehen mit Fettglanz und kleinen Bläschen, ferner rissige Glasur, welche sich oft wie ein Netz über den Gegenstand spannt, machen das Porzellan für die Elektrotechnik unbrauchbar. Mehr oder weniger kann man, besonders bei Hochspannungsisolatoren, üble Erfahrungen damit machen.

Oft treten diese Glasurrisse erst nach Monaten bei eintretender stärkerer Erwärmung oder Kälte auf, so dass diesem Übelstande schon bei der Fabrikation grosse Beachtung geschenkt werden muss.

Die durch Drehen, Pressen, Giessen und Stanzen hergestellten Artikel werden getrocknet, was in grösseren Fabriken in eigens dazu eingerichteten, mit Dampf geheizten Trockenräumen geschieht. Dabei verändern die Gegenstände ihre Farbe, die, im feuchten Zustande grau, allmählich in weiss übergeht.

Grössere Gegenstände mit starken Wandungen müssen sehr behutsam und langsam getrocknet und vor Zugluft geschützt werden, wenn man Risse verhüten will. Derartige beim Trocknen entstandene Risse kommen erst nach dem ersten oder zweiten Brande zum Vorschein. Kleinere Isolatoren sind schon in einigen Tagen trocken und können geglüht werden, dagegen bedürfen grössere einer ein- bis zweimonatigen Trockenzeit.

Das Brennen der getrockneten Porzellanmasse geschieht in Öfen ziemlich komplizierter Konstruktion. Das Wesen des Porzellanbrandes verlangt eine mit Kohlenstoff übersättigte Flamme. Jeder Luftzutritt, der eine vollkommene Verbrennung ermöglichen könnte, ist zu vermeiden. Man findet daher auch in keiner Industrie eine unrationellere Ausnutzung des Brennstoffes, als in der Porzellanbrennerei, indem kaum mehr als 15 $^0/_0$ des Heizwertes der Kohle zur Verwendung kommen. Gas- oder Generatorgasöfen — ein solcher steht in der Königlichen Porzellanmanufaktur Charlottenburg — werden zwar viel gepriesen und auch wohl verwendet, aber man greift immer wieder auf den stehenden Flammenofen zurück. Es liegt dieses Erfordernis, wie oben gesagt, eben in der Eigenart des Porzellanbrandes. Die getrocknete Masse wird in Kästen, sogenannte Kapseln aus Chamottemasse, gebracht und diese dann 18 bis 24 Stunden gebrannt. Dadurch verliert die Porzellanmasse ihren letzten Wassergehalt, hat ein gelbliches Aussehen, etwas Klang und auch etwas grössere Festigkeit als vor dem Brande, ist aber immer noch sehr mürbe und leicht zerbrechlich. Die verglühten Gegenstände zeichnen sich durch besondere Porosität aus, so dass ein darauf fallender Wassertropfen begierig aufgesogen wird. Dieses Verhalten begünstigt die Glasierung, die vor dem weiteren Brennen flüssig geschieht. Der Körper saugt die Flüssigkeit (gemahlenen Quarz, Feldspat, Kaolin, Kalk u. s. w. in Wasser) begierig auf

und es bleibt nur ein feines, weisses Pulver an der Oberfläche der Masse. Sollen kleinere Flächen unglasiert bleiben, so werden diese vorher mit Öl bestrichen oder durch Kautschukschablonen gedeckt.

Nach dem Glasieren werden die Körper wieder in Kapseln gebracht und im sogenannten Glattofen wiederum gebrannt. Die Temperaturen der einzelnen Öfen sind verschieden, denn es herrschen im unteren (Scharffeuer-) Ofen circa 1800 bis 2000° C., in dem obersten 600 bis 800° C. Zur Bedienung des Ofens und überhaupt zur Erzielung guter Resultate bedarf es eines mit der Leitung des Brandes und Ofens innig vertrauten Personals; nur dann kann man das von so vielen Zufälligkeiten abhängige gute und gleichmässige Porzellan erlangen.

Bei einem Ofen von 6 m Durchmesser und 3 m Höhe stellen sich die Arbeitszeiten ungefähr wie folgt:

Füllen des Ofens	20	Stunden
Vorfeuer	8	„
Scharffeuer	14	„
Abkühlen des Ofens	38	„
Entleeren des Ofens	10	„

wozu im ganzen für die drei Etagen des Ofens ein Personal von circa 40 Personen erforderlich ist. Der Kohlenverbrauch ist zwei Waggon Braunkohle und ein Waggon Steinkohle.

Ist nun der Brand so weit gediehen, dass der Brenner die Beendigung des Brandes für angezeigt hält, so wird „eine Probe gezogen". Es werden mittels Haken aus dem Innern die zu diesem Zweck eingestellten Porzellanbecher entnommen, an deren Aussehen der Fortschritt des Brandes zu erkennen ist. Zeigt der Probebecher, dass Masse und Glasur ausgebrannt sind, so ist der Brand als beendet anzusehen. Mit dem Schüren wird aufgehört, die Heiztüren werden gut verschlossen und verschmiert und der Ofen sich selbst überlassen. Nach circa 24 bis 36 Stunden ist er genügend abgekühlt, worauf die Kapseln herausgenommen und entleert werden können. Die Waren kommen dann in einen Sortierraum, in dem die unbrauchbaren Stücke herausgesucht werden.

Untersuchung der Isolatoren.

112. Prüfung der Isolatoren auf ihre mechanischen Eigenschaften.

Die Widerstandsfähigkeit des Isolators gegen Entladungen, welche quer durch das Material gehen und in der Regel vom Draht nach der Stütze erfolgen, wird um so grösser sein, je besser das Porzellan behandelt worden ist; nur in höchster Temperatur gebranntes Porzellan ist imstande, genügende Durchschlagsfestigkeit zu gewährleisten. Als Erkennungsmittel für die Güte des Porzellans giebt die Porzellanfabrik Hermsdorf an, dass die Bruchfläche des Porzellans ein fettglänzendes weisses Aussehen haben muss und dass ein auf die Bruchfläche gebrachter Tropfen Tinte nicht aufgesogen werden darf. Er muss vielmehr, ohne irgend welche Spuren zu hinterlassen, wieder abgewischt werden können.

Das beste Porzellan zeigt einen glatten Bruch wie Glas. Wenn in dieser Beziehung irgend welche Zweifel über die Qualität des Porzellans vorliegen, muss es in kleine Stücke zerbrochen, einige Zeit in einem trocknen, warmen

Raum aufbewahrt, gewogen und für einen Tag unter Wasser gesetzt werden. Nach Herausnahme aus dem Wasser muss das Gewicht der Porzellanstückchen dasselbe geblieben sein, wie zuvor.

Bevor Isolatoren für eine bestimmte Kraftübertragungsanlage verwendet werden, müssen sie genau untersucht werden, ob sie frei von Rissen, Blasen oder Höhlungen sind, welche ihre Festigkeit beeinflussen würden, oder in welchen sich Feuchtigkeit ansammeln könnte. Sind dieselben von Porzellan, so bedecke die Glasur die ganze äussere Fläche.

Infolge der vielen Zufälligkeiten, welchen die Isolatoren in der Fabrikation ausgesetzt sind, ist es erforderlich, dieselben einer genaueren Prüfung auch unter Spannung zu unterziehen und werden neuerdings schon von den Porzellanfabriken, nicht erst von den Installationsfirmen, alle Hochspannungsisolatoren unmittelbar nach Fertigstellung einer Durchschlagsprüfung unterzogen.

113. Prüfung der Isolatoren auf ihre elektrischen Eigenschaften.

Zur Zeit, als nur Strom von geringer Spannung übertragen wurde, war es nicht erforderlich, der Prüfung der Isolatoren grössere Aufmerksamkeit zu schenken. Eine oberflächliche Besichtigung des fertiggestellten Materials genügte. Hierdurch wurden natürlich Fehler, welche im Innern des Stückes vorkamen, nicht ermittelt, und wenn auch ab und zu durch Zerschlagen einzelner Isolatoren festgestellt wurde, ob die Masse an sich geeignet sei, so war doch dieses Verfahren überaus unsicher, weil bei der gleichen Fabrikation durch alle möglichen Umstände doch ganz verschiedene Glocken hergestellt werden können. Es ist ja nicht gesagt, dass, wenn thatsächlich ein Teil der untersuchten Isolatoren gut ist, die anderen desselben Brandes dieselbe Güte haben müssen.

Um richtige Schlüsse aus den Isolatoruntersuchungen zu ziehen, müssen bestimmte Thatsachen berücksichtigt werden. Jeder Isolator kann z. B. nicht mit einer gegebenen Spannung geprüft werden, welche die im Betriebe auftretende erheblich übersteigt, da bekanntlich alle Isolationsmaterialien lange einwirkenden elektrischen Spannungen gegenüber nachgiebig sind. Die bei den Wicklungen elektrischer Maschinen übliche imprägnierte Umspinnung widersteht vorübergehend der zwei- bis dreifachen Spannung, welcher sie beständig ausgesetzt ist. Glas und Porzellan werden nun zwar nicht in demselben Masse durch die Zeit beansprucht, wie organische Materialien, aber es ist bekannt, dass sowohl die Wicklungen als auch die beiden genannten Materialien durch langanhaltenden Gebrauch bei niedrigeren Spannungen, als für welche sie bestimmt waren, durchschlagen worden sind, welchen sie aber bei den ersten Prüfungen widerstanden haben.

Auch die Form der Spannungskurve hat einen starken Einfluss auf den Durchschlag der Isolatoren. Isolationsmaterialien, welche mehr durch die Zeit als durch die Luft beeinflusst werden, zeigen an ihrer Art, dem Durchschlag zu widerstehen, dass die mittlere Spannung wichtiger ist als die höchste.

Es ist nicht richtig, die zur Prüfung verwendete Spannung als den für die Bestimmung des Isolationswertes allein in Frage kommenden Faktor anzunehmen, vielmehr ist auch der Feuchtigkeitsgehalt der Luft von grossem Einfluss auf die lichtbogenbildende Entfernung. Im Wasserdampf springt eine bestimmte Spannung zweimal so weit und im Nebel 25 % weiter über, als unter normalen Verhältnissen. Wenn also die Spannung hoch und die Luft verdünnt oder feucht ist, wird auch der Lichtbogen eine grössere Entfernung überspringen. Bei der Besprechung einer der besten Prüfstationen (Seite 168 d. Bd.) werden wir sehen, dass diese Umstände durch die Art der



Fig. 181.

Prüfeinrichtungen und der Prüfung selbst weitgehende Berücksichtigung erfahren.

Wenn ein Isolator aus mehreren Teilen zusammengesetzt ist, soll jeder einzelne Teil imstande sein, einer grösseren Spannung zu widerstehen, als er auszuhalten hat, wenn der komplette Isolator geprüft wird. Wenn derartige Isolatoren mit 100000 Volt geprüft werden, muss jeder einzelne Teil mindestens 70000 Volt aushalten. Dabei werden auch gleichzeitig untaugliche Teile ausgemustert, ehe sie zusammengebaut werden.

114. Prüfstation der Porzellanfabrik Klosterlausnitz.

Eine Prüfstation für Isolatoren[1]) hat die Elektr.-A.-G. Schuckert & Co. für die Porzellanfabrik Klosterlausnitz erbaut. Die Anlage besteht aus einer Wechselstrommaschine, welche 78 Volt liefert und deren Spannung durch Transformatoren mit dem Übersetzungsverhältnis von 1:640 bis auf 50000 Volt erhöht werden kann. Die Transformatoren (Fig. 181) werden durch Funkenstrecken gegen zu hohe Spannungen geschützt, welche bei derartigen Versuchen durch Resonanz auftreten können. Durch eine besondere Einrichtung ist es möglich, eine Hintereinanderschaltung der beiden Transformatoren zu erreichen.

Die Transformatoren arbeiten auf zwei getrennte Prüfräume. Von Station I aus (Fig. 182) kann mit Hilfe eines Widerstandes die Erregerstrom-

1) Nach Angaben, welche die Porzellanfabrik Hermsdorf-Klosterlausnitz gütigst zur Verfügung stellte.



Fig. 182.

stärke und somit die Spannung der Wechselstrommaschine reguliert werden. Ein Starkstromausschalter kann den Primärstromkreis selbstthätig unterbrechen, wenn im Sekundärkreis infolge Durchschlagens eines Isolators Kurzschluss entsteht.

Als Warnungszeichen für das Personal ist an der Schalttafel eine Lampe für rotes Licht installiert, welche aufleuchtet, sowie der Maschinenregulator bethätigt wird und somit die Leitungen unter Hochspannung liegen.

In Station II befinden sich dieselben Schalteinrichtungen, nur fehlt hier der Maschinenregulator.

Die Hochspannungsleitungen führen zu den Prüfvorrichtungen, deren eine aus einem Bottich aus Schmiedeeisen von circa 2 m Länge, 1·50 m Breite und 15 cm Tiefe besteht, der auf mit Eisenkappen armierten Doppel-Deltaglocken befestigt ist. Die letzteren sind ihrerseits auf gefirnissten Holzbalken aufgestellt, die vom Fussboden nochmals durch 2 cm starke Porzellanplatten getrennt sind.

In einer Höhe von 1·80 m über dem Bottich ist ein System von Messingröhren an Deltaglocken aufgehängt, an denen Messingkettchen eingehakt sind. Diese Kettchen bilden in ihrer Gesamtheit den einen Pol, an welchen die eine Hochspannungsleitung herangeführt ist, während die andere Leitung mit dem Bottich verbunden ist. In diesen sind gefirnisste Bretter eingelassen, in die kreisrunde Löcher, entsprechend den zu prüfenden Isolatorentypen, eingeschnitten sind und in welche die Isolatoren mit dem Kopfe nach unten

eingesetzt werden. Der Bottich wird nach dem Einsetzen der Isolatoren bis zu einer bestimmten Marke mit Wasser gefüllt und hierauf auch in die Gewindelöcher der Glocken soviel Wasser eingelassen, dass dessen Oberfläche mit dem im Bottich befindlichen in gleicher Höhe steht. Hierauf wird ein Messingkettchen in jeden Isolator eingehängt und dann der Hochspannungsstromkreis geschlossen. Ist ein Isolator defekt, so schlägt hier die Spannung über, es entsteht Kurzschluss und der vorerwähnte Automat schaltet die Leitung aus.

In Station I befindet sich über dem Bottich auch noch ein Regenapparat, aus welchem ein feiner Regen auf die in diesem Fall über dem Bottich in senkrechter Stellung angebrachten Isolatoren herabrieselt. Bei dieser Prüfung wird um den Kopf des Isolators der eine Pol der Hochspannung gelegt, während der andere mit den Stützen verbunden ist. Die Prüfung erfolgt also unter durchaus praktischen Verhältnissen.

Bezüglich der Höhe der Prüfspannung gehen die Porzellanfabriken meistens über die durch die Verbandsnormalien verlangten Prüfspannungen[1]) wesentlich hinaus, und zwar spannt die Porzellanfabrik Klosterlausnitz ihre Deltaglocken mit den aus der folgenden Tabelle ersichtlichen Prüfspannungen.

	Betriebsspannung	Prüfspannung
Glocken bis	5 000 Volt	20 000 Volt
„ „	10 000 „	30 000 „
„ „	20 000 „	50 000 „
„ „	50 000 „	100 000 „

Hierbei muss aber noch berücksichtigt werden, dass bei diesen Prüfungen zwischen Draht und Stütze die Spannung herrscht, während sie im Betriebe zwischen zwei Drähten, also auf dem Wege über zwei Isolatoren auftritt. Hierdurch wird die Sicherheit noch wesentlich erhöht.

Im Zusammenhange mit den elektrischen Prüfungen ist es gut, die Muster auch auf mechanische Festigkeit zu untersuchen, wenn der Isolator einer Type angehört, die dies erforderlich macht.

Diese Prüfungen sind besonders wünschenswert bei zusammengesetzten Isolatoren, um sicher zu gehen, dass die einzelnen Teile sich nicht trennen. Solche Isolatoren müssen in Richtung der Bolzenachse geprüft werden, da bei Überlandleitungen, welche durch Bodensenkungen führen, ein nach oben gerichteter Zug nicht selten auf sie ausgeübt wird.

115. Lieferungsvorschriften der Kaiserl. deutschen Reichstelegraphen-Verwaltung.

Interesse haben auch für den Starkstromtechniker die von der Reichstelegraphenverwaltung aufgestellten Lieferungsvorschriften, die hierunter wiedergegeben sind:[2])

Die Porzellandoppelglocken müssen nach Form und Abmessungen den vereinbarten Zeichnungen entsprechen. Von den darin angegebenen Massen sind folgende Abweichungen gestattet:

eine Abweichung von 5% mehr oder weniger für die Stärke des Kopfes;

eine Abweichung von 5% mehr oder weniger für die Höhe der Doppelglocke;

1) Doppelte Betriebsspannung.

2) Nach einer Zusammenstellung von OSKAR OTTO (in FRIESE, Porzellan).

eine Abweichung von 5 % von der kreisrunden Form für den Schraubengang zur Aufnahme der Stütze und von 5 % für die innere Weite der inneren Glocke;

eine Abweichung von 8 % von der kreisrunden Form für den unteren Rand der äusseren Glocke.

Die Porzellanmasse muss einen muschligen, feinkörnigen, glänzenden Bruch — ohne irgend welche Hohlräume im Innern — zeigen, völlig weiss sein und weder im Innern noch im Äussern Risse haben.

Der Kopf und die Glocke dürfen nicht getrennt geformt und durch Zusammenbrennen miteinander vereinigt sein.[1])

Die Glasur muss die ganze innere und äussere Oberfläche der äusseren Glocke und des inneren Zylinders — mit Ausnahme des unteren Randes der äusseren Glocke — vollständig und zusammenhängend bedecken; sie muss ganz weiss sein und darf keine Blasen oder schwarze Punkte zeigen.

Vereinzelte kleine schwarze Punkte in der Glasur und die durch die gebräuchlichen Fabrikzeichen gebildeten Eindrücke sind gestattet, wenn die Doppelglocke im übrigen den Bedingungen entspricht und wenn besonders die Glasur — mit Ausnahme des unteren Randes der äusseren Glocke — vollständig zusammenhängt und die Isolierfähigkeit in keiner Weise beeinträchtigt.

Die Oberfläche der Doppelglocke muss aussen und innen möglichst vollständig eben sein. Kleine Unebenheiten in der Glasur sind bis zur Höhe von höchstens 1 mm gestattet.

Die Doppelglocke darf keine Risse oder Sprünge haben, die mit Glasur verdeckt sind.

Das Schraubengewinde im Kopf der Doppelglocke muss gut ausgeprägt sein und darf keine Ausbröckelungen zeigen. Einzelne Gänge des Gewindes dürfen gegen die übrigen nicht vorstehen.

Die Prüfung und Abnahme der Doppelglocken erfolgt am Bestimmungsort unmittelbar nach der Ankunft. Doppelglocken, die nicht vertragsmässig sind, werden nicht angenommen und nicht vergütet, sondern dem Lieferer, der sie durch vertragsmässige Stücke zu ersetzen hat, am Bestimmungsorte zur Verfügung gestellt. Die einzelnen Lieferungen werden erst dann als erledigt angesehen, wenn der Lieferer für etwa nicht vorschriftsmässig befundene Stücke Ersatz durch Überweisung vertragsmässig beschaffener Doppelglocken geleistet hat.

Bei grösseren Lieferungen behalten sich Private und Behörden das Recht vor, die Herstellung der Doppelglocken in der Fabrik beaufsichtigen zu lassen.

Vielfach werden alle über die Erfüllung eines Vertrages entstehenden Streitigkeiten unter Begebung des Rechtsweges durch einen unparteiischen Schiedsrichter endgültig entschieden. Auf das schiedsrichterliche Verfahren finden dann die Vorschriften der §§ 1025 ff. der Zivilprozessordnung Anwendung.

Wird die Lieferung zu den verabredeten Zeitpunkten gar nicht oder nicht vollständig ausgeführt oder werden die gelieferten Doppelglocken nicht vorschriftsmässig befunden oder die unvorschriftsmässigen nicht rechtzeitig

---

1) Diese Bedingung ist für Hochspannungsglocken, wie aus dem Vorhergesagten ersichtlich, nicht inne zu halten.

durch brauchbare Stücke ersetzt, so wird für den Lieferer eine Konventionalstrafe ausbedungen, ohne dass er dadurch von der Erfüllung des Vertrages entbunden wird. Gewöhnlich gilt diese Strafe nach Ablauf der vereinbarten Lieferfrist als verfallen, ohne dass es der gerichtlichen oder aussergerichtlichen Mahnung bedarf. Auch wird der Unternehmer durch die Annahme der verspätet gelieferten Doppelglocken von der Zahlung der Strafe nicht befreit.

Hat der Lieferer nach Ablauf der ausbedungenen Fristen seinen Verpflichtungen nicht völlig genügt, so ist der Bezieher berechtigt, die fehlenden Stücke auf Kosten des Unternehmers, wo und zu welchem Preise er sie überhaupt am schnellsten erhalten kann, zu beschaffen und versenden zu lassen. Werden auf diese Weise beschaffte Doppelglocken zu billigeren als den ausbedungenen Preisen anderweit gekauft, so hat der Lieferer auf Vergütung des Preisunterschiedes keinen Anspruch.

Wenn der Lieferer nachweist, dass die Verzögerung der Lieferung durch höhere Gewalt oder durch Arbeitseinstellung der Arbeitnehmer verursacht ist, so wird weder eine Konventionalstrafe erhoben, noch treten die Bedingungen bezüglich anderweiter Beschaffung der Lieferung auf Kosten des Lieferers in Kraft. Dagegen hat der Bezieher, sobald eine der vertragsmässig festgesetzten Lieferfristen abgelaufen ist, ohne dass der Lieferer seine Verpflichtungen völlig erfüllt hat, das Recht, den Vertrag gänzlich aufzuheben, ohne dass dem Lieferer ein Schadenersatzanspruch irgend welcher Art zusteht.

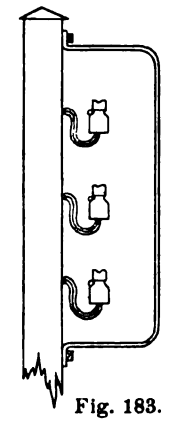
Bei grösseren Lieferungen wird häufig die Stellung von Bürgen oder Kautionen nach den allgemein geltenden Bestimmungen gefordert.

Vorstehende Lieferungsvorschriften bieten ganz oder teilweise einen Anhalt für den Abschluss von Verträgen bei grösseren Lieferungen. Für den Lieferer selbst gelten die allgemein gültigen kaufmännischen Bräuche und die Bestimmungen des Bürgerlichen Gesetzbuches.

Die Befestigung der Leitungen auf dem Isolator.

116. Bindungen.

Um eine betriebssichere Fernleitung zu erhalten, müssen die Leitungen auf den Isolatoren so befestigt werden, dass sie durch die ständigen Bewegungen des Drahtes nicht gelöst werden können. Indessen darf auch durch keine Befestigungsart der Leiter beschädigt und somit in seinem Querschnitt vermindert werden.


Fig. 183.

Die Drähte werden entweder auf dem Kopfe des Isolators oder an seiner seitlichen Rille festgebunden. Um die Leitungen an jedem Isolator in beiden Arten anbinden zu können, ist derselbe meistens mit einer Einkerbung des Kopfes und mit einer rund um ihn herumlaufenden Rille versehen.

Während im allgemeinen auf der geraden Strecke die erste Anordnung gern gewählt wird, muss in Kurven und Winkelpunkten die zweite Anwendung finden. Dabei muss aber der Draht auf die der Zugrichtung entgegengesetzte Seite des Isolators gelegt werden, damit der Zug vom Isolator und nicht vom Bindedraht aufgenommen wird. Ferner besteht durch diese Anbringung insofern eine grosse Sicherheit, als beim

Bruch eines Isolators der Draht nicht abgeschleudert wird und zur Erde fällt, sondern von der Stütze aufgefangen wird. Ausserdem sind an diesen Stellen besondere Fangbügel anzubringen, die, wie Fig. 183 zeigt, einseitig oder in anderen Fällen auch wohl auf beiden Seiten der Maste angeordnet sind (Fig. 169 b).

Als Bindematerial wird meistens weicher Kupferdraht in Stärken von 1·5 bis 2·5 mm verwendet, nur wenn Eisenleitungen verlegt werden, findet, um die Bildung eines Elementes zu vermeiden, das gleiche Material zum Abbinden Verwendung. Hauptsache ist, insbesondere bei Hochspannung, dass

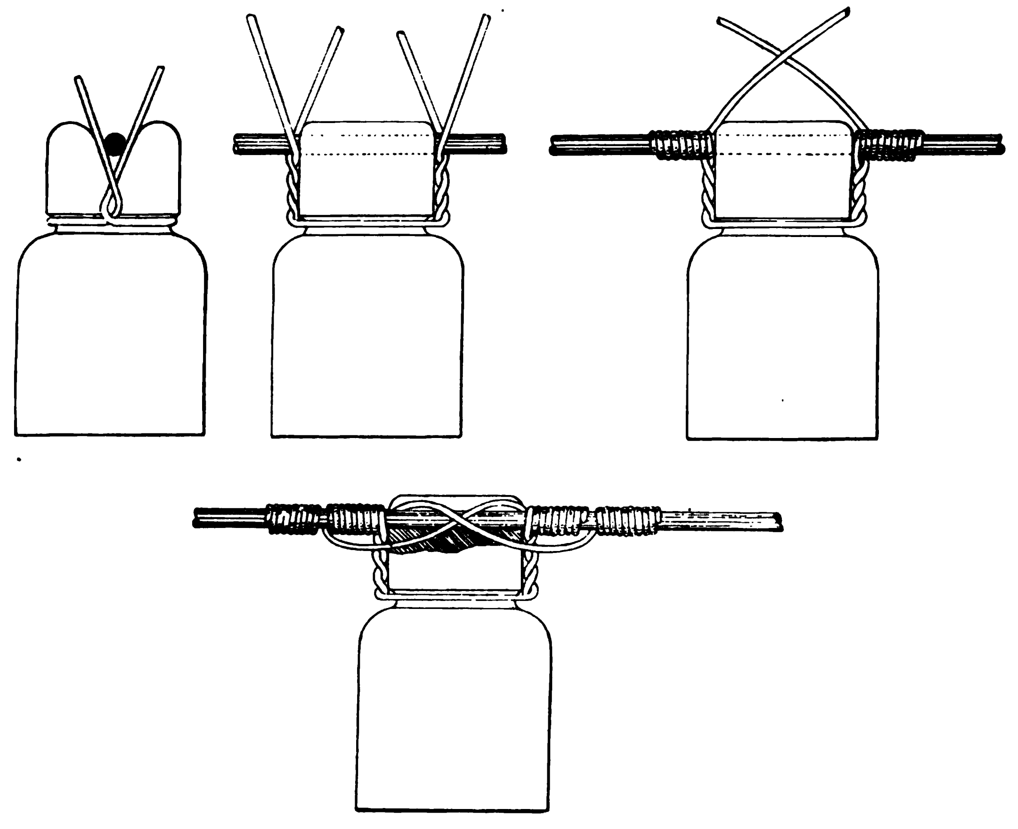


Fig. 184.

durch den Drahtbund die Leitung am Isolatorenkopf unverrückbar fest gelegt wird und dass der Bindedraht nicht in das Leitungsmaterial einschneidet.[1]) Es wird daher auch meistens dem weichgezogenen Kupferdraht als Befestigungsmittel der Vorzug gegeben.

Erfolgt die Befestigung des Drahtes auf dem Kopfe, so wird der sogenannte Oberbund angewendet. Es werden zwei Bindedrähte um den Hals des Isolators gelegt und miteinander verschlungen; hierbei werden die Drahtenden aber ungleich lang gelassen, und zwar so, dass sich auf jeder Seite des Isolators je ein langes und ein kurzes Ende befindet. Der zu befestigende

1) § 23 g der Hochspannungsvorschriften.

Draht wird in die so entstandene Drahtgabel gelegt und dann das kurze Ende des Bindedrahtes fest umgelegt; die längeren Enden werden dann kreuzweise um den Isolatorkopf gelegt und hinter dem festgewickelten anderen Ende ebenfalls um den Leiter gewickelt. Den Gang der Bindung zeigt Fig. 184.

Bei der seitlichen Befestigung des Drahtes ist nur ein Bindedraht erforderlich, der zunächst um den Hals des Isolators, dann um den Leiter und zurück um den Isolator geschlungen wird. Hierauf werden die beiden Drahtenden gut miteinander verwürgt oder um den Arbeitsdraht geschlungen (Fig. 185).

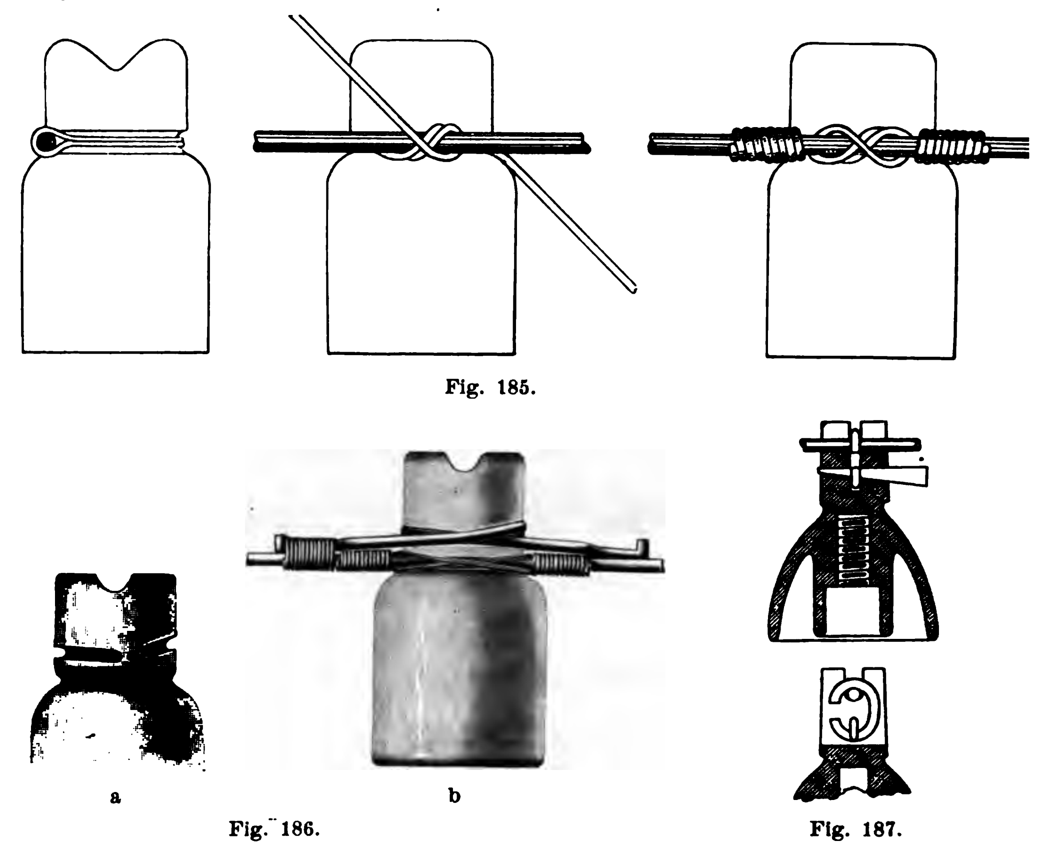


Fig. 185.

Fig. 186.

Fig. 187.

An solchen Stellen, wo ein besonders grosser Leitungszug auftritt, werden oft statt eines Bundes deren zwei angebracht.

Für eine sehr sichere Befestigung der Leitung am Isolator stellen Schomburg & Söhne A.-G., Berlin, einen sogenannten Sturmisolator her, dessen Kopf mit einer schraubenförmigen zweiten Rille versehen ist (Fig. 186 a). Diese Rille dient zur Herstellung einer zweiten Befestigung, die, nachdem der erste Bund in der üblichen Weise hergestellt ist, in der in Fig. 186 b wiedergegebenen Art, die einer besonderen Erläuterung nicht bedarf, hergestellt wird.

Dieser Bund soll überall da Verwendung finden, wo grosse Spannweiten überwunden werden müssen oder wo die Leitungen in oft eingeschnittenem, wechselnden Gelände geführt werden.

117. Schnell herzustellende Befestigungen ohne Bindung.[1])

Um eine schnellere, trotzdem aber ebenso sichere Befestigung der Leitung am Isolator zu erzielen, sind häufig Versuche angestellt worden, die Bindedrähte zu umgehen. Fig. 187 stellt einen Isolator dar, der von SCHUCKERT verwendet wurde. Der Kopf ist kreuzweise eingeschnitten, jedoch derart, dass der eine Einschnitt tiefer als der andere eindringt. In den ersteren wird die Leitung eingelegt und dieselbe nunmehr unter Zuhilfenahme eines in den tieferen Einschnitt eingelegten offenen Ringes und eines Keiles fest gegen den Isolatorkopf gezogen. Es dürfte wohl angenommen werden können, dass durch diese Befestigungsart die Leitung ausreichend festgehalten wird, ob indessen die Festigkeit der Isolatoren immer ausreichend ist, ist fraglich.

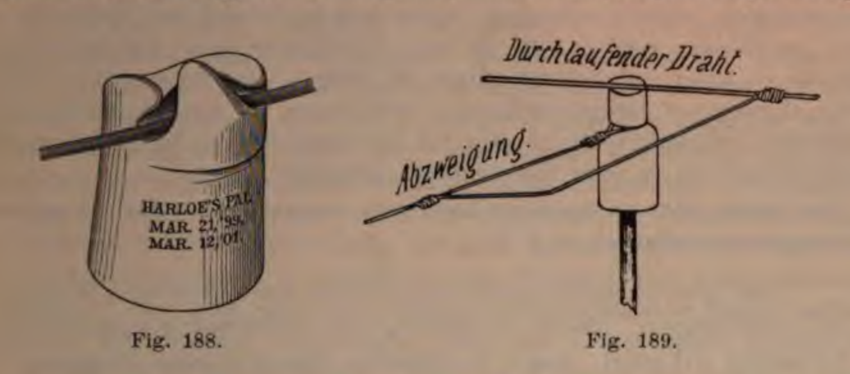


Fig. 188. Fig. 189.

In Fig. 188 ist eine Isolatorenkonstruktion wiedergegeben, bei welcher der Draht weder festgebunden, noch durch irgend einen Konstruktionsteil festgeklemmt wird. Der Kopf ist mit drei eigenartig ausgebildeten Erhebungen versehen, zwischen welchen der Draht eingelegt wird. Durch das Anspannen desselben klemmt er sich selbst fest; jedoch ist es erforderlich, dass er ab und zu an einem Isolator festgebunden wird.[1])

Über die Verbindung der Leitungen unter sich ist schon das Erforderliche gesagt.[2]) Es sei hier nur noch an der Hand von Fig. 189 gezeigt, wie durch die Art der Verlegung eine Verbindung zwischen zwei Drähten hergestellt wird, ohne dass die Verbindungsstellen mechanisch beansprucht werden.

Allgemeine Anordnung der Freileitungen.

118. Freileitungen an Strassen.

Freileitungen folgen häufig den Strassenzügen, wenn hier nicht schon beide Seiten seitens der Postbehörden für Telegraphenleitungen in Anspruch genommen sind. Ist diese Aufstellung jedoch möglich und die Wahl der Strassenseite frei, so empfiehlt sich die der am häufigsten vorkommenden Windrichtung entgegengesetzte Seite, im mittleren Deutschland also besonders die Ostseite, damit durch den am meisten auftretenden Weststurm im Falle eines Bruches die Masten nicht über die Strasse fallen.

In vielen Fällen wird jedoch, insbesondere um eine Verminderung der Kosten herbeizuführen, eine kürzere Trace gewählt, die über Felder führt, wo dann auch die an Strassen erforderlichen Schutznetze wegfallen können.

---

1) Diese Befestigungsart ist alt und wurde schon 1856 angewendet; siehe Archiv für Post und Telegraphie 1892, Telegraphentechnik der Praxis.

2) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 64 u. ff.

Indessen treten hierbei häufig grosse Schwierigkeiten dadurch auf, dass die Besitzer der Grundstücke, sofern sie nicht selbst ein Interesse an der Anlage haben, das Setzen von Masten und das Spannen der Leitungen nicht zulassen und rechtlich auch kaum dazu gezwungen werden können.

119. Rechtliche Verhältnisse. Enteignung bei Fernleitungen.

Die Elektrotechnik[1]) geniesst, trotzdem sie eine so ungeheure Rolle spielt, rechtlich durchaus nicht den Schutz, der ihr als Kulturmittel ersten Ranges wohl zukommen müsste. Es ist dies wohl darauf zurückzuführen, dass die Anschauungen im Rechtsverhältnis und der Gesetzgebung nicht gleichen Schritt mit den Lebensverhältnissen in der Elektrotechnik halten und auch kaum halten konnten. Hierher gehören in erster Linie die grossen Schwierigkeiten, welche entstehen, wenn fremder Grund und Boden in Anspruch genommen werden soll, da eine Enteignung unter den bestehenden Verhältnissen kaum möglich ist. Dass im übrigen das Deutsche Reich bisher auf ein allgemeines Elektrizitätsgesetz verzichtete, ist nur anerkennenswert, da dasselbe jedenfalls nicht günstig auf die Entwickelung der Elektrotechnik eingewirkt und sie in ihrer Entwickelung gehemmt hätte.

Das Gesetz vom preussischen Landrecht vom 11. Juni 1874 besagt über das Enteignungsverfahren in § 1:

> „Das Grundeigentum kann aus Gründen des öffentlichen Wohles für ein Unternehmen, dessen Ausführung die Ausübung des Enteignungsverfahrens erfordert, gegen vollständige Entschädigung entzogen oder beschränkt werden."

Es steht also von seiten des preussischen Rechtes (das der Bundesstaaten ist hierin nicht viel anders) der Enteignung nichts im Wege, wenn das Werk nur als dem öffentlichen Wohle dienend angesehen wird. Den Klein- und Nebenbahnen wird auch, wenn sie im Privatbesitze sind, das Enteignungsrecht regelmässig zugebilligt, doch wird nicht anerkannt, dass Elektrizitätswerke auch dem öffentlichen Wohle dienen.

Folgendes Beispiel möge die Sachlage in nähere Beleuchtung bringen.

Ein Braunkohlenwerk, dessen Kohle so minderwertig ist, dass sich ein Transport per Achse von der Grube bis zur nächsten 30 km entfernten Industriestadt nicht einrichten lässt, will diesem Übelstande abhelfen. Man gedenkt entweder eine Bahn zur Stadt zu bauen, oder man will auch die Kohle an der Grube selbst verbrennen, damit Elektrizität erzeugen und diese nach dem Industriezentrum leiten. Dadurch würde man den kleinen Konsumenten an Stelle der Kohle gleich Kraft in fertiger Form abgeben können und die Konsumenten würden sich dabei unbedingt besser stellen. Ausserdem würden die Einwohner noch elektrisches Licht brennen und die Kraft für chemische Zwecke und Heizung nutzbar machen können.

Es liegt klar auf der Hand, dass das Enteignungsrecht der Bahn ohne jeden Widerspruch, dagegen dem Elektrizitätswerk wohl nur mit vieler Mühe oder gar nicht erteilt werden würde, obwohl die Art des Transportes der Energie in letzterem Falle weiteren Volksschichten zugute käme.

---

1) ETZ 1898, Heft 27, S. 435; 1899, Heft 5, S. 91; 1904, S. 566. WENGLER, Elektrizität und Recht, Leipzig 1900. MEILI, Die elektrischen Stark- und Schwachstromanlagen und die Gesetzgebung, Zürich 1899. PFLEGHART, Die Elektrizität als Rechtsobjekt, Strassburg 1901.

Dass das Bedürfnis eines Enteignungsrechtes in der That vorhanden ist, mögen folgende Ausführungen beweisen:

Vielfach liegen Elektrizitätswerke mit grossen Fernleitungen im Gebirge, weil das Vorhandensein von Wasserkräften deren Ausnutzung wünschenswert macht. Die Leitungen ziehen sich im Thale hin und es müssen Strassen gewählt werden, die nicht schon von Telegraphen- oder Telephonmasten besetzt sind, denn die strengen Vorschriften der Post lassen eine Vereinbarung schlecht zu. Man ist also auf Nebenwege angewiesen, wodurch aber wiederum Durchfahrten sehr eng oder aber angeblich verengt werden, so dass man schliesslich gezwungen ist, die Stangen auf Privateigentum zu setzen.

Durch das Reichs-Telegraphen-Wegegesetz [1]) ist bei Anlagen der deutschen Postbehörde das Recht gegeben, die Fernleitungen von Strassen fortzudrängen, welche für Schwachstromleitungen benutzt werden. Allerdings muss anerkannt werden, dass die Reichs-Postverwaltung allgemein den § 12 des Telegraphengesetzes bisher mit Schonung und Berücksichtigung der industriellen Verhältnisse angewendet hat. Dieser Paragraph des Telegraphengesetzes ist jedoch theoretisch einer Verweigerung vieler öffentlicher Strassen für Starkstromzwecke gleichwertig und man ist gezwungen, die Starkstromleitungen in Streitfällen in manchmal ganz unglaublicher Weise ihrem Ziele zuzuführen. Ja, man muss schliesslich so unzugängliche Stellen benutzen, dass eine Revision nur mit grossen Umständen vorgenommen werden kann.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass dem Werk mit der Erlaubnis Stangen zu setzen, allein nicht gedient ist; der Grundbesitzer muss auch das Recht einräumen, den Boden unterhalb der Leitungen zum Zwecke der Revision, Reparatur u. s. w. zu betreten. Um so viel wie möglich vom Besitzer unabhängig zu sein, müsste dieses Recht ins Grundbuch eingetragen werden können.

Des öfteren gehört aber das in Anspruch zu nehmende Gelände den Gemeinden, welche die Benutzung nicht gestatten, und es ist fraglich, ob die höheren Verwaltungsbehörden berechtigt sind, dagegen Massregeln zu ergreifen, da die Gemeinden als Grundeigentümer behaupten, alleiniges Verfügungsrecht über ihren Grund und Boden zu haben.

Man hat nun keine Gewalt, die notwendige Überlassung des Landes zu ermöglichen, da ja das Enteignungsrecht nicht erteilt ist. Hier kann nur gütliche Vereinbarung zum Ziele führen.

Eine weitere Schwierigkeit bietet auch die Verlegung der Fernleitungen durch ländliches Terrain, da dieses im allgemeinen den Bauern zu gehören pflegt. Dem Bauer fehlt aber der Scharfblick für das Allgemeinwohl und er verbindet gewöhnlich Gewinnsucht und Misstrauen mit Gedanken über die dunkle Gefahr u. s. w. In den meisten Fällen werden nun derart hohe Forderungen gestellt,[2]) dass diese gar nicht im Verhältnis zu den Beschränkungen stehen, die durch das Setzen der Gestänge im Grundeigentum wohl eintreten würden. Es ist sogar vorgekommen, dass ganze Leitungsstrecken umgelegt werden mussten, weil die Maste mit der Hälfte ihres Durchmessers, etwa 10 cm in das Grundstück eines Besitzers hineinragten, welcher der Anlage des Elektrizitätswerkes hinderlich sein wollte.

---

1) Vgl. ETZ 1899, S. 889, 895.
2) Siehe MEILI, S. 18.

Nun kommen noch die unendlichen Mühen hinzu, welche man zur Erreichung des Zweckes mit den Leuten hat, die einesteils von dem Projekte gar nichts wissen wollen, andererseits diesem gar feindselig gegenüberstehen. Nehmen wir nun aber an, die Gestänge seien gesetzt und das Leitungsziehen beginnt . . . Es werden jetzt neue Konflikte mit den Grundeigentümern entstehen, bei denen Ecken oder Teile von Grundstücken mit Drähten überspannt werden müssen, da der Luftraum über dem Grundstück auch dem Eigentümer des letzteren gehört.

Diesem Verhältnis ist aber im neuen Bürgerlichen Gesetzbuch durch § 905 schon teilweise Rechnung getragen, in dem es heisst:

> „Der Eigentümer (eines Grundstückes) kann jedoch Einwirkungen nicht verbieten, die in solcher Höhe oder Tiefe vorgenommen werden, dass er an der Ausschliessung kein Interesse hat."

Inwieweit dies aber dem Elektrizitätswerk zugute kommt, wird in vielen Fällen noch durch richterliche Entscheidung erwiesen werden müssen,[1]) zumal, wie aus den Erläuterungen zum B. G.-B., Ausgabe von Achilles, hervorgeht, nicht vom Eigentümer, sondern vom Gegner der Beweis geführt werden muss, dass der erstere kein Interesse an der Inanspruchnahme des Luftraumes oder des Erdinnern seines Grundstückes haben kann.

Ein weiterer Missstand ist noch darin zu suchen, dass in den mit den einzelnen Grundbesitzern aufzustellenden Verträgen Kündigungsrechte vorbehalten bleiben, wodurch auch noch der sichere Betrieb eines Werkes in Frage gestellt ist, denn diese Kündigungsfrist wird von den Besitzern möglichst kurz gestellt und es ist dann von dessen Laune abhängig gemacht, ob sie in eine Verlängerung des Vertrages willigen.

Enteignungsrechte kämen ausser den vorerwähnten noch in Frage, wenn sich eine Erweiterung des Elektrizitätswerkes erforderlich macht und die benachbarten Baugrundstücke nicht zu erhalten sind. Für den **Neubau** eines mit Dampf, Gas, Petroleum getriebenen Elektrizitätswerkes dagegen kann billigerweise das Enteignungsrecht nicht verlangt werden, da dieses nicht an eine bestimmte Stelle gebunden ist; anders liegen die Dinge bei der Ausnützung von Wasserkräften.

Meili[2]) verlangt für die folgenden Fälle das Enteignungsrecht:

I. für die elektrische Anlage und Zubehörteile und Mittel, nämlich
   a) für das Ziehen von Drähten und Setzen von Stangen,
   b) für die Anbringung von Stützpunkten an Gebäuden,
   c) für das Aufstellen von Überführungs- und Kabeltürmen (je mit Zugangsrecht zu denselben);

II. für die Einrichtungen zur Fortleitung und Verteilung der elektrischen Kraft (nicht aber für die Einrichtungen zur Erzeugung der elektrischen Kraft);

III. für die Anlage von Transformatorenstationen mit ihren Zubehören in unmittelbarer Nähe und bei durchlaufendem Betrieb für Wärterhäuser.

---

1) Vgl. ETZ 1898, S. 329; 1899, S. 160, Reichsgerichtsentscheidung, betr. das Wegerecht; 1904, S. 367, 567. EA 1905, S. 128.

2) Meili, S. 26.

120. Enteignungsrecht in ausserdeutschen Ländern.

In England hat sich unter dem Namen „Central-Electricity Supply Company" eine Gesellschaft gegründet, welche die Durchführung des Enteignungsrechtes gegen Gemeinden und Private in die Wege leitet und sich grösster Sympathieen erfreut.[1])

Italien ist in dieser Beziehung England vorausgeeilt, denn es wurde bereits am 24. Juni 1894 ein Gesetz über die Übertragung von Energie mittels elektrischen Stromes erlassen,[2]) durch welches eine wesentliche Hebung der Industrie erreicht wurde.

Die Kraftübertragungs-Leitungen auf der Strecke Paderno-Mailand oder Tivoli-Rom sind zum Unterschiede von den deutschen, vielfach auf Umwegen verlaufenden Linien, in schnurgeraden Linien verlegt, was nur unter dem Schutz der herrschenden Gesetze erreicht werden konnte.

Die Schweiz hat durch Bundesgesetz vom 24. Juni 1902 das freie Durchgangsrecht für die Leitungen aufgestellt und noch früher schon hatte der Schweizer Kanton Glarus jedes elektrische Unternehmen als ein gemeinnütziges angesehen.

In Österreich ist dem Ministerium ein Gesetzentwurf zugegangen, der Telegraphenwegegesetz und Starkstromgesetz in sich vereinigt.[3])

In Finnland besteht ein Gesetz für elektrische Anlagen, welches im § 3 Enteignung oder Beschränkung des Privateigentums gestattet.

Auch in Frankreich hat man in den letzten Jahren den Segen eines diesbezüglichen Gesetzes vermisst und die französische Regierung hat der Deputiertenkammer einen Gesetzentwurf unterbreitet unter Beifügung eines Berichtes, dem nachstehendes entnommen sei.

Durch eine bessere Organisation der Energie-Übertragungsanlagen wird ein wesentlicher Aufschwung der französischen Industrie erwartet. Die Verwendbarkeit der im Gebirge gelegenen Wasserkräfte lässt die Vorteile einer elektrischen Kraftübertragung um so mehr erkennen, als von der Küste des Atlantischen Ozeans nach dem Innern des Landes hinein die Kohlenpreise enorm steigen (1896 von 9·7 Francs am Ärmelkanal bis 35 Francs im Departement Haute-Savoie). Fast 150 Mill. Francs gehen pro Jahr für den Ankauf von Kohlen ins Ausland, da die Produktion nicht den Bedarf deckt. Von den etwa 10 Millionen PS, welche die Wasserkräfte Frankreichs erzeugen, werden von der Industrie nur ungefähr 1 Million PS in Anspruch genommen.

In dem Bericht wird darauf hingewiesen, dass durch die Verhältnisse in der Schweiz dieses Land mit einem Netz von Energieverteilungsanlagen bedeckt ist. Dadurch kann mit Hilfe der ungeheuren Energiemengen aus den Alpen den kohlenreichsten Ländern ebenbürtig Konkurrenz gemacht werden.

Das Einschreiten einer Gesetzesgewalt in Frankreich sei erforderlich, heisst es in dem Bericht weiter, weil man bei der Übertragung und Verteilung der Energie in die Wohnhäuser gezwungen sei, öffentliche Strassen in Anspruch zu nehmen und privates Eigentum öfter zu überschreiten. Die unsicheren und widerruflichen Erlaubnisse der Behörden und Privaten zur

1) Im übrigen erfordert die geringste Beschränkung des Eigentums eines Einzelnen einen besonderen Gesetzgebungsakt.
2) Vgl. ETZ 1894, S. 407.
3) Vgl. ETZ 1904, S. 257.

Benutzung von Strassen bieten zur Anlage der Kapitalien einen zu geringen Schutz; dem Verlangen nach sichereren Verhältnissen könnte eine Gegenleistung des Unternehmers immerhin gegenübergestellt werden. Diese würde in der Verpflichtung zur Einhaltung eines Maximaltarifes bei Abgabe elektrischer Energie bestehen können.

Recht und billig wäre es, das Enteignungsrecht allerseits gelten zu lassen, da Elektrizitätswerke, welche grössere Bezirke mit Energie versorgen, ebenso als dem öffentlichen Wohle dienend betrachtet werden müssen, wie z. B. eine Bahn, die in vielen Fällen sogar von privater Seite gebaut wird.

121. Freileitungen innerhalb von Ortschaften und Grundstücken.

Freileitungen innerhalb der Ortschaften und Grundstücke sind hauptsächlich mit Rücksicht darauf anzuordnen, dass sie von Gebäuden aus nicht erreichbar sind; wo die Entfernung nicht gross genug gewählt werden kann, muss durch die Anordnung von Schutzverkleidungen, Schutznetzen oder dergleichen eine ausreichende Sicherheit geschaffen werden, um so mehr, als in Ortschaften die Eisenkonstruktionen unmittelbar an oder auf den Häusern angebracht werden. Bei Hochspannung wird man dagegen in vielen Fällen vorziehen, von dieser Anordnung ganz abzusehen und für die Leitungen ebenso wie im freien Gelände besondere Leitungsmaste aufzustellen. Erschwerend wirken in vielen Fällen behördliche Vorschriften, die aus ästhetischen Gründen erlassen werden, oder auch in Massnahmen der Feuerwehren ihren Grund finden. So dürfen z. B. in Berlin die Höfe der Grundstücke von Freileitungen nicht überspannt werden. Die Leitungen müssen an den Gebäuden entlang laufen, dürfen aber auch hier nicht weiter als 30 cm über die Mauerfläche vortreten. Dafür ist aber isolierte Leitung vorgeschrieben, die dieselbe Isolierung aufweisen muss, wie die im Innern verlegten Leitungen. Welchen Wert die Isolierung im Freien hat, haben wir an anderer Stelle bereits gesehen. Freileitungen in Ortschaften müssen während des Betriebes streckenweise ausschaltbar sein.

Kreuzungen von Freileitungen mit Strassen und Bahnkörpern.

122. Kreuzungen mit Hilfe hoher Maste.

Hochspannungsleitungen werden trotz der hierbei auftretenden Schwierigkeiten gern abseits der Verkehrsstrassen geführt; wo man jedoch Ortschaften, Strassen oder Eisenbahnen kreuzen muss oder sich ihnen nähert, sind besondere Vorsichtsmassregeln zu treffen, um die Passanten oder Eisenbahnen vor fallenden Masten oder Drähten zu schützen.

Richtige Berechnung und Dimensionierung der Freileitungen, sowie der Masten und Gestänge bieten den grössten Schutz gegen Drahtbrüche. Bei grossen Spannweiten pflegt man Stahlseile zu spannen und an diesen die Starkstromleitungen isoliert zu befestigen. Da indessen die Überspannungen verhältnismässig grossen Gefahren ausgesetzt sind, so genügen sie nicht immer, und insbesondere an solchen Orten werden weitere Vorsichtsmassregeln verlangt, an denen Telegraphen- und Telephonleitungen gekreuzt werden und wo überhaupt irgend welche Behörden die Genehmigung zur Überspannung zu erteilen haben. Es genügen nicht allein einfache Schutznetze, vielmehr werden häufig kastenartige Geflechte verlangt, die, zumal wenn Schnee- und Eisdruck hinzutreten, die Gestänge ausserordentlich belasten. Ebenso bieten sie dem Wind eine bei weitem grössere Angriffsfläche,

so dass an und für sich eine einfache Leitung bedeutend sicherer erscheint, als eine solche mit derartig ausgedehnten Schutznetzen.

Zur Herbeiführung grösseren persönlichen Schutzes sind besondere Erdungsvorrichtungen an Schutznetzen und eisernen Masten vorzusehen und es sind Vorkehrungen zu treffen, dass Hochspannungsmaste von Personen nicht erklettert werden können. Als zweckmässig hat sich die Anbringung von Stacheldraht an diesen Masten bewährt, ferner auch die Anordnung von Spitzen, welche unter 45° nach unten zeigen, etwa wie es Fig. 136 zeigt.

Fig. 190.

Bei Strassen und Bahnkreuzungen kann man drei Wege einschlagen, um zum Ziele zu kommen.

1. Man setzt unmittelbar zu beiden Seiten der Strasse zwei Maste von solcher Höhe, dass ein brechender und herabfallender Draht immer noch 3 m vom Erdboden entfernt bleibt. Diese Anordnung wird sich auch ohne Schwierigkeiten gut ausführen lassen, wenn die Trace der Freileitungen die Strasse senkrecht schneidet. Kreuzen beide aber unter einem mehr oder weniger von 90° abweichenden Winkel, so werden die Überführungsmaste einen hohen seitlichen Zug aufnehmen müssen, so dass entweder entsprechend verstärkte Maste oder starke Verankerungen vorgesehen werden müssen. Infolge der erforderlichen Höhe und dementsprechend erforderlichen grösseren Festigkeit der Maste erhöhen sich jedoch dann die Kosten unverhältnismässig.

123. Kreuzungen mit Hilfe von Schutznetzen.

2. Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse beim zweiten Fall, wenn bei Kreuzungen Schutznetze unterhalb der Leitungen angeordnet werden. Hier muss dann noch auf die Mehrbelastung der Gestänge durch Winddruck,

Schnee- und Eisbelastung Rücksicht genommen werden. Indessen wird der zweiten Anordnung der Vorzug vor der ersten schon aus dem Grunde gegeben, weil die Maste nicht so hoch gewählt werden brauchen.

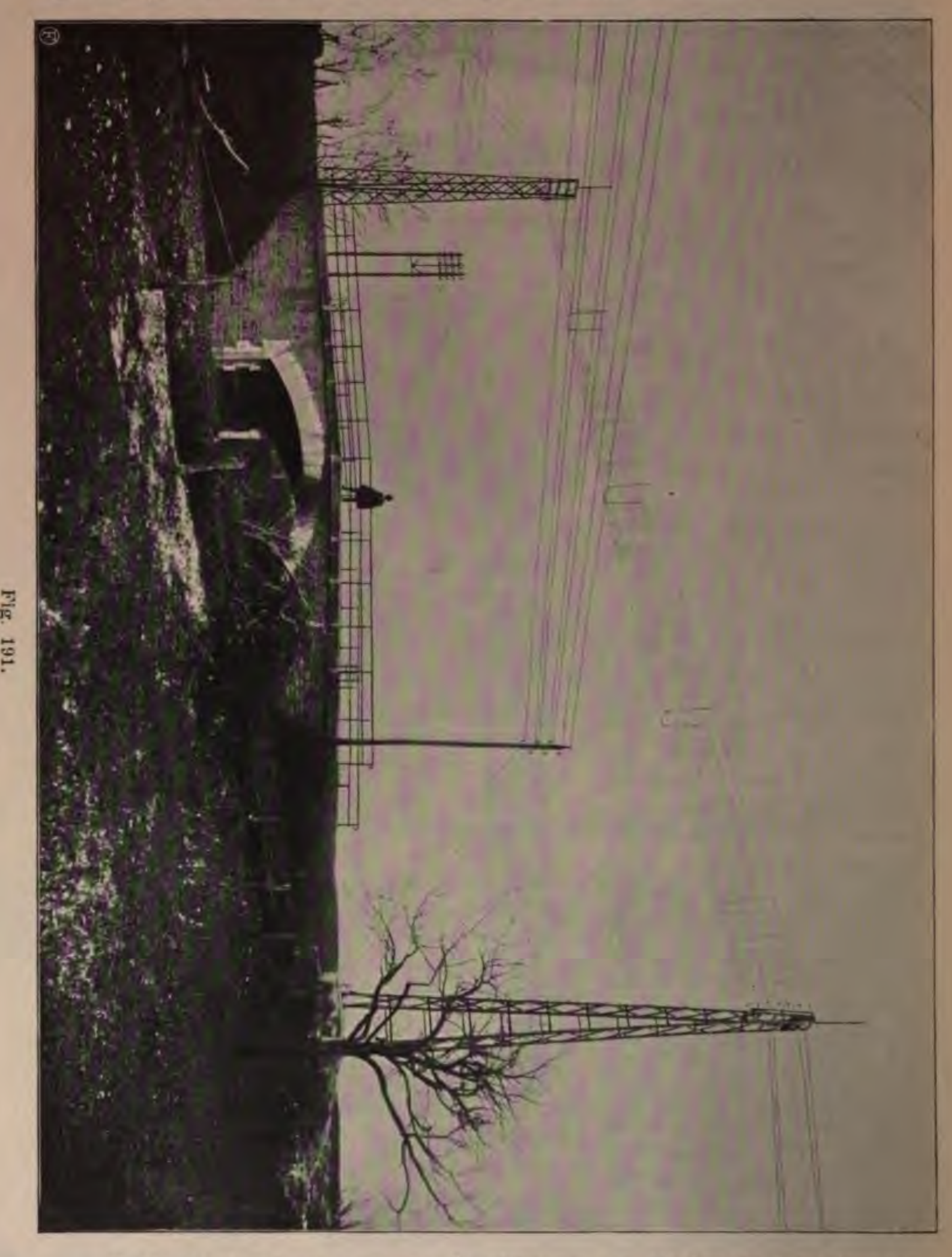


Fig. 191.

Nicht selten müssen, um die Überführung von Hochspannungsleitungen über Bahnkörper überhaupt zu ermöglichen, besondere Brückenkonstruktionen errichtet werden, auf denen entweder die Stützen der für die blanken Lei-

tungen bestimmten Isolatoren festgeschraubt werden, oder auf denen Hochspannungskabel direkt verlegt werden (Berliner Elektrizitätswerke, Zentrale Putlitzstrasse, Überführung über die Hamburger- und Ringbahn). Eine derartige nach Entwürfen des Greizer Eisenwerkes skizzierte Überführungskonstruktion zeigt Fig. 190.

Fig. 191 zeigt die Bahnüberführung der von Örlikon ausgeführten Hochspannungsleitung nach BONDRY, die durchweg auf 10 bis 12 m hohen Holzmasten verlegt ist; bei der im Bilde gezeigten Überführung treten jedoch an ihre Stelle schwere Gittermaste, an denen aus Stahldraht gefertigte Schutznetze angeordnet sind.

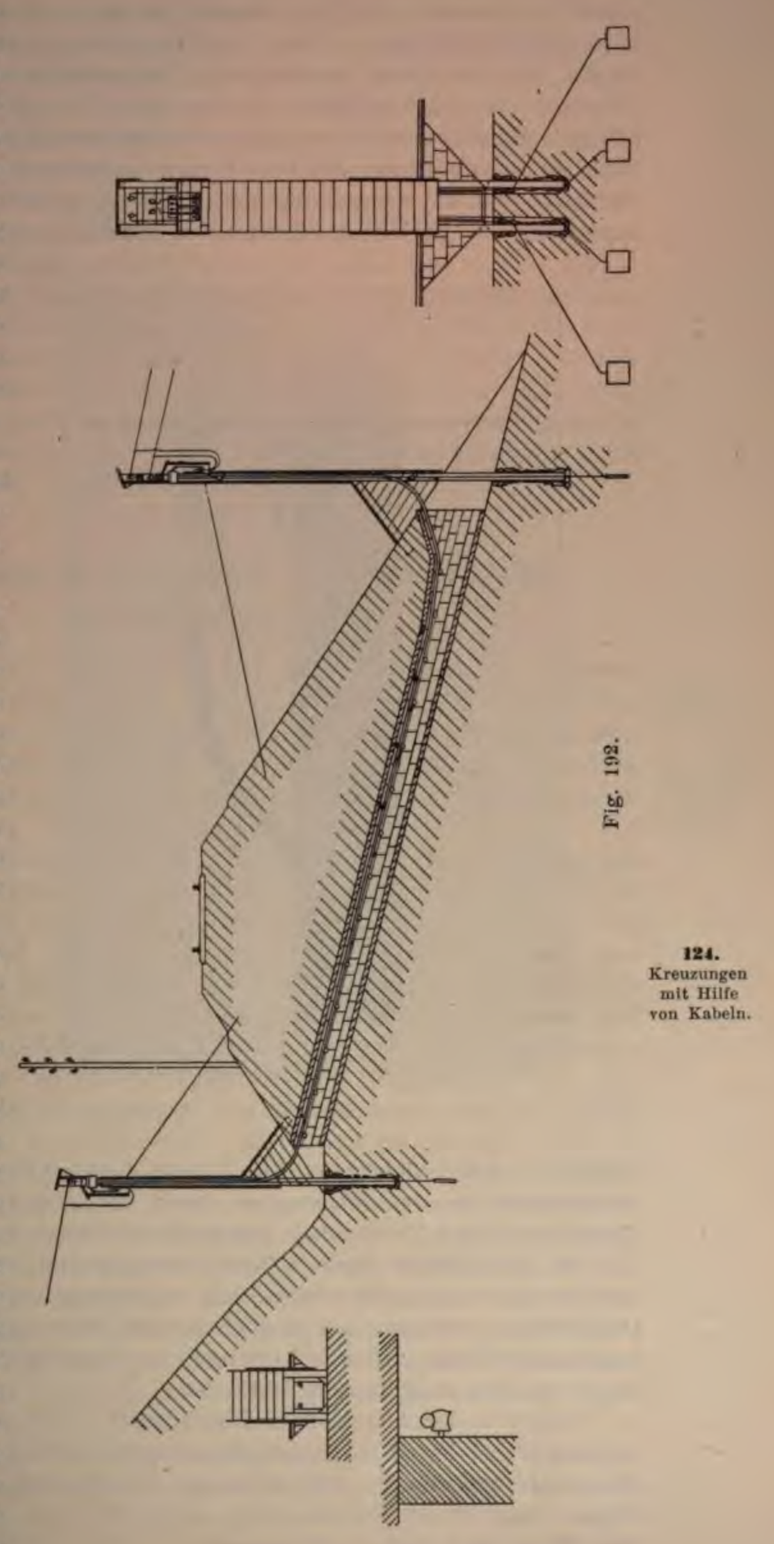


Fig. 192.

124. Kreuzungen mit Hilfe von Kabeln.

3. Drittens kann auch von einer Überführung der Hochspannungsfreileitungen ganz abgesehen werden. Statt dessen werden Kabel verlegt, die unter der zu kreuzenden Strasse oder Bahn durchgeführt werden. Zu beiden Seiten werden kräftige Maste angeordnet, an denen die Kabel in die Höhe geführt werden, wo sie in Endverschlüssen endigen. Da dieselben allen Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, werden ausschliesslich kräftige gusseiserne Gehäuse

gewählt, die dann mit Kabelmasse ausgegossen werden. Sorgfältige Befestigung des Kabels am Mast ist Hauptbedingung, da sich dasselbe sonst längen und aus dem Endverschluss herausrutschen kann. Um das Kabel oberhalb der Erdoberfläche — an und für sich werden schon eisenarmierte Kabel verwendet — gegen mechanische Beschädigungen zu schützen, wird es entweder in eiserne Rohre eingezogen, die dann ausgegossen werden, oder es werden bei der Verwendung von Holzmasten statt eines zwei Maste in geringem Abstand von einander angeordnet, zwischen denen das Kabel hochgeführt wird. Durch Brettchen, welche an beiden Seiten gegen die Maste genagelt werden, wird ein Hohlraum geschaffen, in dem das Kabel sicher ruht. Diese Anordnung zeigt

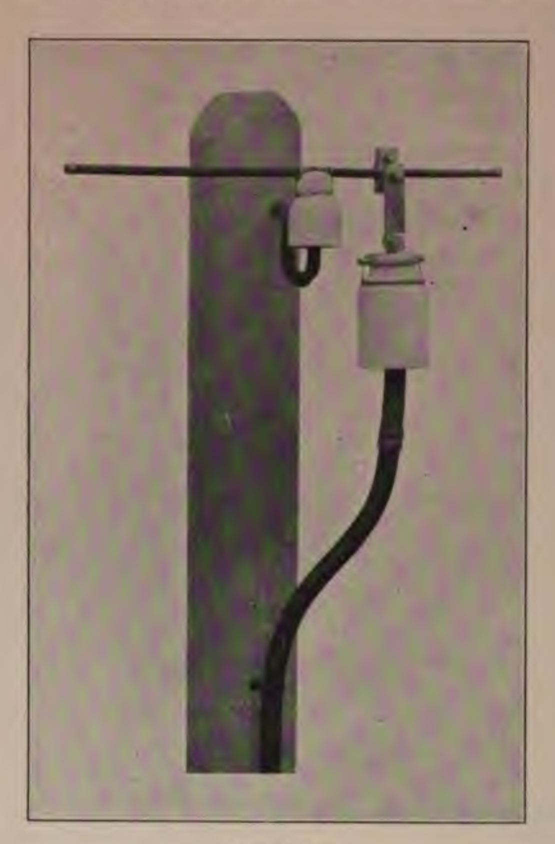


Fig. 193.



Fig. 194.

Fig. 192. Sehr wichtig ist der Schutz dieser Kabel gegen Atmosphärilien, insbesondere an den Stellen, an denen sie aus der Erde treten, wo also Feuchtigkeit und Trockenheit beständig wechseln.

Wo kein Schutz durch Eisenrohre vorgesehen ist, muss das Kabel hauptsächlich an dieser gefährdeten Stelle mindestens halbjährlich einmal mit Teer angestrichen werden. Der Anschluss der Freileitungen an das Kabel wird unter Anwendung isolierter Leitungen so ausgeführt, dass die Verbindungsstelle von Zug möglichst entlastet ist.

Eine von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin gewählte Anordnung zeigt Fig. 193, deren Einzelheiten noch in Fig. 221 erläutert sind. Eine Kabelanordnung, für derartige Überführungsstellen gebaut von den Siemens-Schuckert-Werken, Wien, zeigt Fig. 194. Das Kabel kommt durch den hohlen Mast zum Endverschluss.

Grosse Aufmerksamkeit muss der Unterführung des Kabels unter dem Bahn- oder Strassendamm gewidmet werden. Auf keinen Fall kann es hier in der üblichen Weise unmittelbar in das Erdreich gelegt werden, da es beim Transport schwerer Lasten stark gequetscht werden könnte. Zum mindesten wird ein sicherer Schutz durch übergezogene Eisenrohre geschaffen, wenn man nicht vorziehen sollte, wie dies von Örlikon bei einer Bahnunterführung in der im Berner Jura gelegenen Anlage „La Goule" geschah, einen besonderen gemauerten Kanal vorzusehen (Fig. 192). Gleichgültig, welche Art der Unterführung gewählt wird, sie muss ein starkes Gefälle haben, um eindringendes Wasser rasch abzuführen. Die Überführungsmaste werden stets so weit von der Strasse entfernt gehalten, dass sie im Falle eines Niedergehens der Gestänge die Strasse nicht erreichen können. Kabelunterführungen sind schwache Stellen einer Fernleitung, da hier in der Freileitung auftretende atmosphärische Entladungen nach der Erde durchzubrechen streben. Infolgedessen werden zu beiden Seiten der Strassenübergänge die Fernleitungen allpolig mit Blitzschutzvorrichtungen[1]) ausgerüstet.

Vorrichtungen, welche die Fernleitungen im Falle eines Bruches stromlos machen.

125. Abschaltung unter Vermittelung von Automaten und Kontaktinstrumenten.

Statt der vorerwähnten Schutzmassregeln können auch in der Zentrale selbst Anordnungen getroffen werden, welche die Strecke, in welcher eine Leitung reisst, spannungslos machen oder das Ausschalten derselben einleiten. In der Regel werden Minimalausschalter verwendet oder Relais angeordnet, die bei der Stromunterbrechung in einer Leitung einen sekundären Stromkreis schliessen, der einen allpoligen Ausschalter bethätigt.

Die Ausserbetriebsetzung einer Fernleitung kann in einer Wechselstromanlage auch dadurch erfolgen, dass der Erregerstromkreis der Generatoren unterbrochen wird. Dieser Vorgang kann von der Fernleitung aus eingeleitet werden, falls Drahtbrüche eintreten sollten. Die Unterbrechung darf aber erst erfolgen, wenn der Betriebsstrom auf Null zurückgegangen ist. Um dies zu erreichen, werden in die Fernleitung Kontakt-Amperemeter eingeschaltet, welche beim Rückgang des Zeigers auf Null einen Maximalausschalter beeinflussen, der in den Erregerstromkreis eingeschaltet ist. Die Anzahl dieser Instrumente ist abhängig von der Stromart und der Anzahl der Leitungen; während bei Wechselstrom ein Instrument genügt, sind bei Drehstromleitungen deren drei anzuordnen. Es ist jedoch nicht erforderlich, besondere Instrumente anzuschaffen, man kann in bequemer Weise die in jeder Leitung sowieso vorhandenen Instrumente mit einer Kontaktvorrichtung versehen. Eventuell sind an Stelle dieser auch Solenoide verwendbar. In Verbindung mit dieser Einrichtung können auch noch automatische Schalter eingebaut werden, welche nach Abschaltung des Erregerstromkreises auch die Fernleitung von der Zentrale abtrennen. Ist die Erregermaschine eine Hauptstrommaschine, so tritt an die Stelle des automatischen Ausschalters ein Kurzschliesser.

Um den Bruch von Leitungen in Hochspannungsanlagen unschädlich zu machen oder ihn doch wenigstens anzuzeigen, benutzen Siemens & Halske ein

---

1) Näheres siehe Hdb. VI, 1.

Drehfeldgerät.[1]) Dasselbe wird von den die Freileitungen durchfliessenden Strömen mittelbar oder unmittelbar derart beeinflusst, dass nur ein pulsierendes, aber keine Kraftwirkung ausübendes Feld entsteht, wenn ein Teil der Strecke abgeschaltet wird. Im Falle eines Bruches tritt jedoch ein Drehfeld und demzufolge ein Drehmoment auf, welches zur Bethätigung einer Signaleinrichtung führt oder die sofortige Ausschaltung der betreffenden Strecke veranlasst.

Der Apparat (Fig. 195) besteht, ähnlich den Drehfeldmessgeräten, aus einem Ringe von unterteiltem Eisen mit drei nach innen vorspringenden zwei-

Drahtbruchrelais

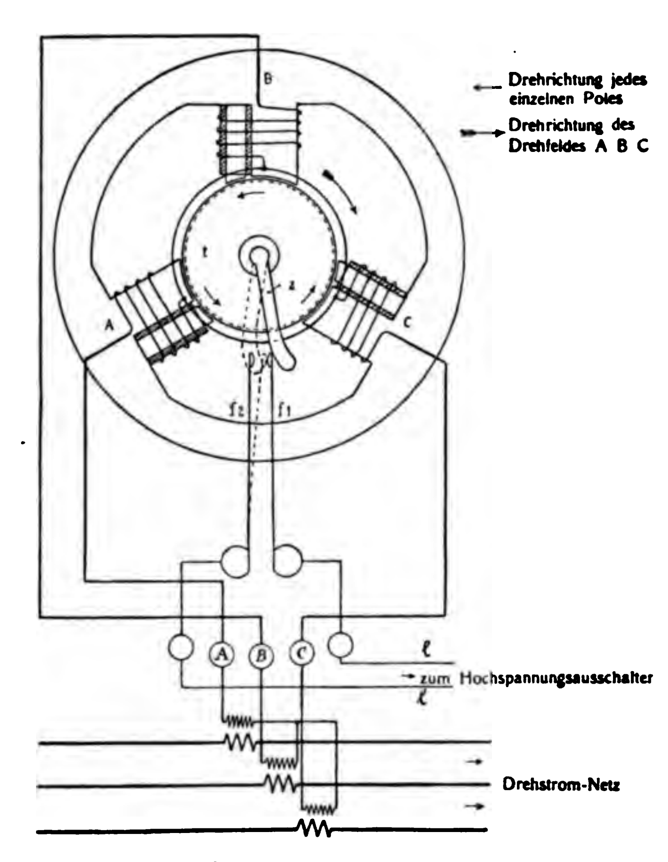


Fig. 195.

teiligen Polansätzen, deren Wicklungen unter Zwischenschaltung von Stromtransformatoren durch die Fernleitungen gespeist werden. Zwischen den Polansätzen und dem in der Mitte befindlichen Eisenkern ist eine leichte Metalltrommel *t* drehbar gelagert. Ein mit der Trommel verbundener Arm *z* berührt bei entsprechender Drehung den festen Anschlag f_1 oder die Feder f_2, die bei Berührung mit f_1 einen Hilfsstromkreis schliesst.

Der Dreiphasenstrom übt in bekannter Weise ein Drehmoment in bestimmter Richtung auf die Trommel aus, das in vorstehender Figur im Sinne

1) D. R.-P. 130225. — Fortschritte der Elektrotechnik 1902, S. 2488.

des Uhrzeigers wirkend gezeichnet ist. Dieses Drehmoment wird zu Null, sobald infolge Unterbrechung einer der Leitungen der entsprechende Pol nicht mehr erregt wird.

Durch Kurzschlusswicklungen auf den schmalen Teilen der zweiteiligen Polansätze übt jeder Pol auch einzeln, ohne Mitwirkung der beiden anderen, ein Drehmoment auf die Trommel aus. Diese Einzeldrehmomente wirken dem Momente des Drehfeldes entgegen, sind also entgegen dem Drehsinn des Uhrzeigers gerichtet. Ihre Summe ist etwas geringer gewählt worden, als das Moment des Drehstromfeldes.

Unter der Wirkung des etwas überwiegenden Drehmomentes, das durch den Drehstrom hervorgerufen wird, dreht sich die Trommel aus einer beliebigen Stellung im Sinne des Uhrzeigers, bis der Arm z an den festen Anschlag f_1 stösst. In dieser Stellung verbleibt die Trommel unabhängig von der Stärke der von den Leitungen geführten Ströme, solange der ordnungsmässige Zustand der Leitung erhalten ist. Sobald aber eine der Leitungen unterbrochen wird, verschwindet das Drehstromfeld und die Einzeldrehmomente der noch erregten beiden Pole drehen nunmehr die Trommel rückwärts, bis der Arm z die Kontaktfeder f_2 berührt und gegen den Anschlag f_1 drückt. Dadurch wird der zu dem Elektromagneten des selbstthätigen Hochspannungsschalters führende Hilfsstromkreis geschlossen, der Elektromagnet löst die Sperrung des Hochspannungsschalters aus und damit werden sämtliche Leitungen abgeschaltet.

Würden sich die beiden erwähnten, einander entgegenwirkenden Drehmomente das Gleichgewicht halten, so könnte die Trommel in beliebiger Lage stehen bleiben, z. B. auch so, dass ihr Arm z die Kontaktfeder f_2 dauernd berührt, so dass bei einer Erschütterung die unzeitige Bethätigung der Auslösung zu befürchten wäre. Da das Drehstromfeld aber überwiegt, so liegt der Arm z bei ordnungsmässigem Zustand der Leitung an dem festen Anschlag f_1 und muss daher erst einen Weg von nahezu 360^0 machen, bevor der Hilfsstromkreis geschlossen wird.

Weil alle Drehmomente bei sinkender Stromstärke in gleichem Verhältnis abnehmen, ist ein unzeitiges Unterbrechen der Leitung infolge sinkender Belastung ausgeschlossen.

Macht man den vorher als fest angenommenen Anschlag f_1 ebenfalls federnd, so kann der beschriebene Apparat gleichzeitig auch zur Bethätigung eines Maximalausschalters verwendet werden. Bemisst man nämlich die Federkraft von f_1 so, dass bei einem bestimmten resultierenden Drehmoment der Trommel im Sinne des Drehstromfeldes der Kontakt zwischen f_1 und f_2 geschlossen wird, so öffnet sich der selbstthätige Schalter auch bei sonst ordnungsmässigem Zustande der Leitungen, sobald deren Stromstärke ein gewisses Mass überschreitet.

126. Erdende Ösen.

Ausserdem können durch den Bau der Strecke an sich Vorrichtungen getroffen werden, die brechende Hochspannungsleitungen spannungslos machen. — Zu diesem Zwecke wurden z. B. an den Gestängen geerdete Ösen aus starkem Draht derart angeordnet (Fig. 196),[1]) dass der Leiter in der Mitte lag. Die Grösse der Öse wurde so bemessen, dass auch bei starkem Winde die Leitung nicht anschlagen konnte. Im Falle eines Bruches legte sich der gebrochene Draht an die Öse und wurde somit geerdet. Der Wert einer

1) ETZ 1896, S. 197.

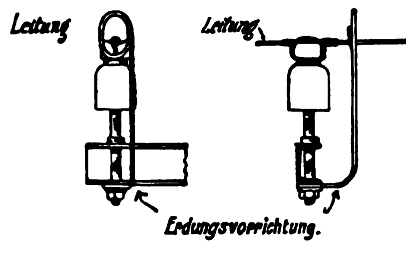


Fig. 196.

derartigen Vorrichtung hängt nun ganz und gar davon ab, wie gross der Erdungswiderstand ist, wobei zu berücksichtigen ist, dass in vielen Fällen bei weit ausgedehnten Fernleitungen eine gute Erdung überhaupt nicht oder nur unter grossen Kosten zu erreichen ist. Diese Anordnung wird daher nicht mehr angewendet.

127. Gouldsche Kupplung.

Nach dem GOULD schen Patent wird die Fernleitung in einzelnen Längen zwischen die Isolatoren gespannt, mit denen sie den Zusammenhang aufgeben, sobald eine Leitung reisst.

Diese von SIEMENS & HALSKE früher vertriebene Konstruktion wird in abweichender Form von der Gesellschaft für Strassenbahnbedarf, Berlin, verwendet;[1]) sie hat gegenüber den Schutznetzen den grossen Vorteil, dass sie nicht wie jene bei Reparaturen an den Leitungen hinderlich sind, auch keine grössere Belastung der Gestänge durch Schnee und Wind herbeiführen.

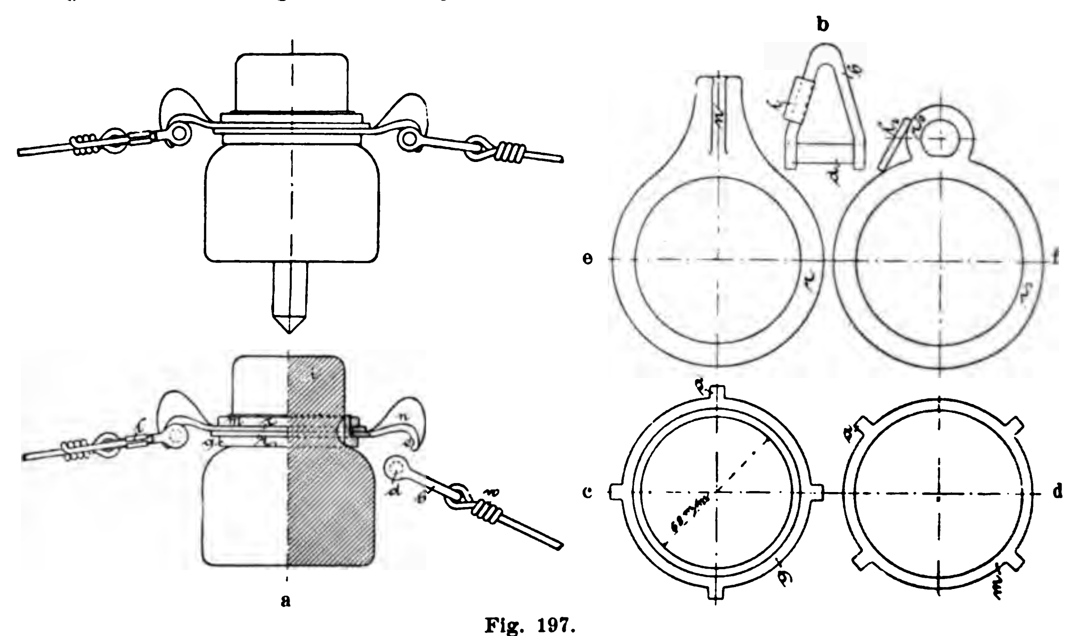


Fig. 197.

In Fig. 197 a ist die Sicherheitskupplung auf einem Isolator montiert, in ca. $^1/_4$ natürlicher Grösse dargestellt. Einzelteile derselben sind in den Fig. 197 b bis f abgebildet.

Die aus Rotguss hergestellte und verzinnte Kupplung besteht aus einem Gewindering g mit Mutterring m (Fig. 197 a, c und d), aus zwei Nasenringen r, r_1 (Fig. 197 a und e), sowie aus zwei Bügeln b (Fig. 197 a und b).

Der Gewindering g ist derart dimensioniert, dass er auf den Isolator aufgesteckt werden kann. Die Nasenringe r, r_1 sitzen auf dem Gewindering drehbar; der Mutterring m wird auf den Gewindering aufgeschraubt und gestattet ein Feststellen der Nasenringe r, r_1. Um ein besseres Festziehen zu

1) DINGLERS Polytechnisches Journal 1899, Bd. 313, Heft 8.

erreichen, ist der Gewindering g sowie der Mutterring m mit Ansätzen a (Fig. 197 c und d), an welche passende Schlüssel angesetzt werden können, ausgestattet.

Die Ringe r, r_1 besitzen Nasen n, welche bei möglichster Materialersparnis ein Verbiegen bezw. Zerreissen der Sicherung verhindern und entsprechend der zulässigen Zugfestigkeit dimensioniert sind. Die Bügel b werden in Einfraisungen e eingehängt, welche in dem unteren Teil der Nasen n angebracht sind. Die Bügel selbst bestehen aus einem V-förmigen Gussstück, durch dessen Schenkel ein Stift d aus gezogenem Rotguss gesteckt, vernietet und verlötet ist.

Die Bügel b haben ferner Lappen l, in welche das Ende des Leitungsdrahtes eingelötet wird, nachdem derselbe durch Umwickeln bei w mit dem Bügel zur Erzielung einer guten leitenden Verbindung verbunden ist. Die Enden des Lappens werden hierbei umgebogen und geben dem Drahtende beim Einlöten, zur Bequemlichkeit und zur Erzielung einer besseren Berührungsfläche, einen Halt.

Die Sicherungen werden fertig montiert geliefert, d. h. die Ringe g, m, r, r_1 zusammengefügt und die erforderlichen beiden Bügel b jeder Vorrichtung lose beigegeben.

Die Installation wird nun auf der Strecke in der Weise ausgeführt, dass die Leitungsstücke, aus der Länge der Entfernung von Mast zu Mast und dem Durchhangs- und Befestigungsverlust sich zusammensetzend, zugeschnitten und mit je einem Ende und Bügel verbunden werden. Ohne weitere Befestigung werden nun die eigentlichen Sicherungen auf die Isolatoren aufgesteckt und die Bügel in die Einfraisungen eingehängt. Die bis dahin noch lose drehbaren Nasenringe r, r_1 werden von dem nun wirkenden Drahtzug von selbst in die etwa durch die Leitung gebildeten und durch den Strassenweg bedingten Winkel gedreht, worauf dann nach Ansetzen der beiden Schlüssel an die Ringe g, m der letztere angezogen und die Stellung der beiden Nasenringe r, r_1 unveränderlich zu einander festgelegt wird.

Ein guter Kontakt zwischen der Einfraisung e des Nasenringes und dem Stift d des Bügels ist für Erreichung des sicheren Funktionierens wesentlich und es empfiehlt sich sehr, auf gute Berührung besonderes Gewicht zu legen. Wenn ein Nasenring mit Bügel bei Einführungen und an Stellen, an denen die Hochspannungsleitung ohne Sicherungen weiterläuft, entbehrlich ist, kann ein Nasenring r durch einen Abschlussring r_2 (Fig. 197 f) umgetauscht werden. Der Leitungsdraht wird dann an dem kleinen Ring r_0 des Ringes r_2 durch eine Spirale w wie bei Bügel b befestigt und das Ende des Drahtes bei l_2 eingelötet.

Die Herstellung der vorbeschriebenen Sicherungen erfolgt je nach Querschnitt der Leitung und für verschiedene Zugfestigkeiten (je nach Mastentfernung). Es hat sich diese Schutzvorrichtung insofern als sehr vorteilhaft erwiesen, als bei einem Leitungsbruch sich die Bügel sofort aus den Einfraisungen e lösen und die beiden Leitungsstücke mit den Bügeln stromlos zur Erde fallen (Fig. 197 a). Die Leitung ist somit direkt an den Isolatoren unterbrochen und, wie aus der Figur rechts am Isolator zu ersehen, bleibt dann die Verbindung offen.

Nach verschiedenen praktischen Erfahrungen zu urteilen, soll das Funktionieren der Apparate stets sicher von statten gehen, auch ist die Montage einfacher, wie diejenige anderer dem gleichen Zweck dienenden Schutzvorrichtungen.

Bei Verwendung dieser Sicherheitskupplungen müssen die Hochspannungsleitungen nebeneinander angeordnet werden, wie dies auch aus dem Zweck der Anordnung hervorgeht. Die Verteilung kann je nach Wunsch, Anzahl der Leitungen, lokalen Verhältnissen u. s. w. erfolgen. Auch kann die Anbringung von Telephonleitungen an den Gestängen stattfinden, wenn ein entsprechender Abstand von der Hochspannungsleitung eingehalten wird und zur Vermeidung von Induktionswirkungen etwa an jedem zehnten bis zwanzigsten Gestänge die Hochspannungsleitungen gekreuzt werden.

Die nachfolgenden Tabellen No. 8 A, B, C geben eine vergleichende Übersicht der Kosten von Hochspannungsanlagen mit Sicherheitskupplungen gegenüber denen mit Schutznetzen.

Tabelle No. 8.

A. 1 km Strecke mit 3 Leitungen	Mit Sicherungen ausgerüstet	Mit Schutznetz ausgerüstet
30 Holzmaste, einschl. Setzen derselben	1100	1100
Streben und Anker, einschl. Anbringen	100	100
12 Blitzableiter, 3 × 4 Stück, Material und Anbringen	360	360
90 Hochspannungsisolatoren mit Stützen, Schienen und Installation	360	360
3150 m Leitungsdraht, 35 mm², Kupfer	3150	3150
90 Sicherheitskupplungen für 1000 kg Zugfestigkeit	720	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Kupplungen	135	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Schutznetzen	—	90
Kleinmaterialien für die Leitungsdrahtmontage	5	15
Rot. 1 km Schutznetz nebst allem Zubehör und der fertigen Montage ¹)	—	1800
Allgemeine Kosten, Materialbeförderung, Aufsicht u. s. w.	500	500
	6430	7475

B. 1 km Strecke mit 6 Leitungen	Mit Sicherungen ausgerüstet	Mit Schutznetz ausgerüstet
30 Holzmaste, einschl. Setzen derselben	1100	1100
Streben und Anker, einschl. Anbringen	100	100
24 Blitzableiter, 6 × 4 Stück, Material und Anbringen	650	650
180 Hochspannungsisolatoren mit Stützen und Schienen	700	700
6300 m Leitungsdraht, 35 mm², Kupfer	6300	6300
180 Sicherheitskupplungen für 1000 kg Zugfestigkeit	1440	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Kupplungen	270	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Schutznetzen	—	180
Kleinmaterialien für die Leitungsdrahtmontage	10	30
Rot. 1 km Schutznetz nebst allem Zubehör und der fertigen Montage ¹)	—	1800
Allgemeine Kosten, Materialbeförderung, Aufsicht u. s. w.	750	750
	11320	11610

1) Die Kosten der Schutznetze schwanken bekanntlich sehr, je nach der Maschenweite, Anordnung u. s. w.; hier ist ein niedriger Mittelpreis für das Schutznetz angenommen und zu diesem dann der Aufschlag in derselben prozentualen Höhe getreten, wie bei den übrigen Gegenständen bezw. Preisen (siehe DINGLERs Pol. Journal 1899).

Tabelle No. 8 (Fortsetzung).

C. 1 km Strecke mit 9 Leitungen	Mit Sicherungen ausgerüstet	Mit Schutznetz ausgerüstet
30 Holzmaste, einschl. Setzen derselben	1100	1100
Streben und Anker, einschl. Anbringen	100	100
36 Blitzableiter, 9 × 4 Stück, Material und Anbringen	900	900
270 Hochspannungsisolatoren mit Stützen und Schienen	1000	1000
9450 m Leitungsdraht, 35 mm², Kupfer	9450	9450
270 Sicherheitskupplungen für 1000 kg Zugfestigkeit	2160	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Kupplungen	405	—
Leitungsdrahtmontage bei Verwendung von Schutznetzen	—	270
Kleinmaterialien für die Leitungsdrahtmontage	15	45
Rot. 1 km Schutznetz nebst allem Zubehör und der fertigen Montage[1]	—	1800
Allgemeine Kosten, Materialbeförderung, Aufsicht u. s. w.	1000	1000
	16130	15665

128. Kurzschlussvorrichtung.

Einen selbstthätigen Kurzschliesser[2]) für Hochspannungsfreileitungen zeigt Fig. 198, bei welchem der Kurzschluss zwischen den Fernleitungen auf mechanischem Wege herbeigeführt wird. Dieser Apparat hat zwei Stromschlussstücke, welche mit je einem Pol der Leitung in Verbindung stehen und bei Drahtbruch oder Umfallen des Mastes einen Kurzschluss herstellen, durch welchen die Hochspannungsleitung sofort unterbrochen werden soll.[3])

Der den Kurzschluss herbeiführende Kontakthebel *a* (Fig. 198 a u. b) ist mit zwei gespannten Zugfedern *b* diesseits und jenseits des feststehenden Isolators, an dem der durchgehende Leitungsdraht befestigt ist, so an die Leitung *c* angeschlossen, dass der Hebel durch den Zug der beiden Federn *b* in einer unthätigen Mittelstellung gehalten wird. Beim Reissen der einen oder anderen Drahtlänge wird er durch die an der anderen befestigte Feder in eine Schrägstellung gezogen, in welcher die Leitung kurzgeschlossen wird.

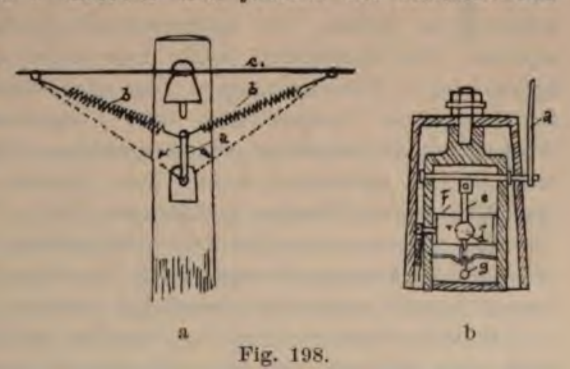


Fig. 198.

An dem Kontakthebel *a* des Kurzschliessers (Fig. 198 b) ist ein beweglicher Arm *e* angebracht, welcher in den Bewegungsrichtungen des Kontakthebels *a* zwangläufig mit letzterem gegen ein Kontaktstück *f* schwingt, nach den anderen Richtungen hin aber pendelt, so dass er beim Umfallen des Mastes sich nach diesen Richtungen hin gegen das Kontaktstück *f* legt, um den Kurzschluss herzustellen. Den Klöppel *d* umschliesst ein Reiter *g*, welcher ersteren erst dann freigiebt, wenn er sich um einen bestimmten Winkel gedreht hat, um kleinere Anfangsschwingungen dieses Klöppels zu unterdrücken.

1) Siehe Anmerkung S. 187.
2) D. R.-P. No. 136 728.
3) Es ist immerhin nicht ausgeschlossen, dass eine Sicherung intakt bleibt und dann bleibt eine Leitung unter Spannung.

Sonstige Vorrichtungen, welche ein Herabfallen der Freileitungen vermeiden sollen.

129. Fangbügel.

An Winkelpunkten kann durch das Platzen von Isolatoren herbeigeführt werden, dass Leitungen herunterhängen. Zwar werden dieselben an der Innenseite des Isolators festgebunden, dieser selbst auch so auf der Stütze befestigt (Fig. 160), dass der Draht, auch wenn der Isolatorkopf abplatzt, von der Stütze aufgefangen werden kann. Hat nun aber der Draht starken Drall, so ist es trotzdem nicht ausgeschlossen, dass er über die Stütze hinwegschlägt. Aus diesem Grunde werden an solchen Stellen Fangbügel angeordnet, die, wie Fig. 169b u. 183 zeigen, über die Leitungen hinwegfassen. Eventuell können diese Fangbügel auch noch geerdet sein.

130. Schutznetze.

Weitgehende Verwendung finden Schutznetze, die ihrer Form nach als offene und als geschlossene verwendet werden und den fallenden Draht auffangen sollen. Um dies sicher zu thun, müssen sie, wenn offen konstruiert, mindestens eine solche Breite haben, dass eine zwischen dem höchsten Leiter und dem Rande des Schutznetzes gezogene Linie gegen die Vertikale einen Winkel von etwa 45° bildet.

Schutznetze werden entweder fertig bezogen und bestehen dann aus Drahtgeflechten verschiedener Form oder sie werden an Ort und Stelle hergestellt, indem zwischen eisernen, an den Masten angebrachten Traversen Längsdrähte gespannt werden, die dann unter sich durch Querdrähte verbunden werden. Die Längsdrähte bestehen aus verzinktem Eisendrahtseil, dessen Stärke 5 mm nicht unterschreiten sollte. Wird Stahldrahtseil verwendet, so könnte ein entsprechend geringerer Durchmesser zugelassen werden. Die Querdrähte wähle man nicht unter 2·5 mm Durchmesser und spanne sie in Zwischenräumen von mindestens etwa 1 bis 1·5 m. Sie werden am Längsdraht festgeklemmt oder festgelötet. Die Querdrähte werden an ihren Enden in die Höhe gebogen, so dass die auf das Netz fallende Leitung nicht seitlich abrutschen kann. Zum gleichen Zweck können statt der glatten Querdrähte spiralförmige gewählt werden.

Bei geschlossenen Schutznetzen werden die Längsdrähte unterhalb und oberhalb der Leitungen angeordnet, die ebenso, wie vorher beschrieben, ringsherum durch Querdrähte verbunden werden.

In den Figuren 199a—g werden nach Konstruktionen von Siemens & Halske-Wien verschiedene Schutzdraht- und Schutznetzträger gezeigt, die auf Masten befestigt werden. Bemerkenswert ist die Form und Art der Querdrähte, wie sie aus Fig. 199g hervorgeht. Dieselben werden vorher über einer Schablone gebogen und später nur über die Längsdrähte gehangen und dort befestigt.

Offene Schutznetze werden in Entfernungen von etwa 50 bis 60 cm unterhalb der Leitungen angebracht. Bei geschlossenen muss jedoch darauf Rücksicht genommen werden, dass durch die Wahl eines grossen Abstandes der Schutznetze von den Leitungen auch die Kosten entsprechend wachsen und dieser daher möglichst nur so weit gewählt werde, wie es die Betriebssicherheit unbedingt verlangt. Als für alle Spannungen ausreichend kann eine senkrechte Entfernung zwischen Leitung und Schutznetz von 40 cm und eine Horizontale von etwa 30 cm angesehen werden. Sind die Spannweiten gering, so dass ein starkes Pendeln der Leitungen nicht erwartet werden

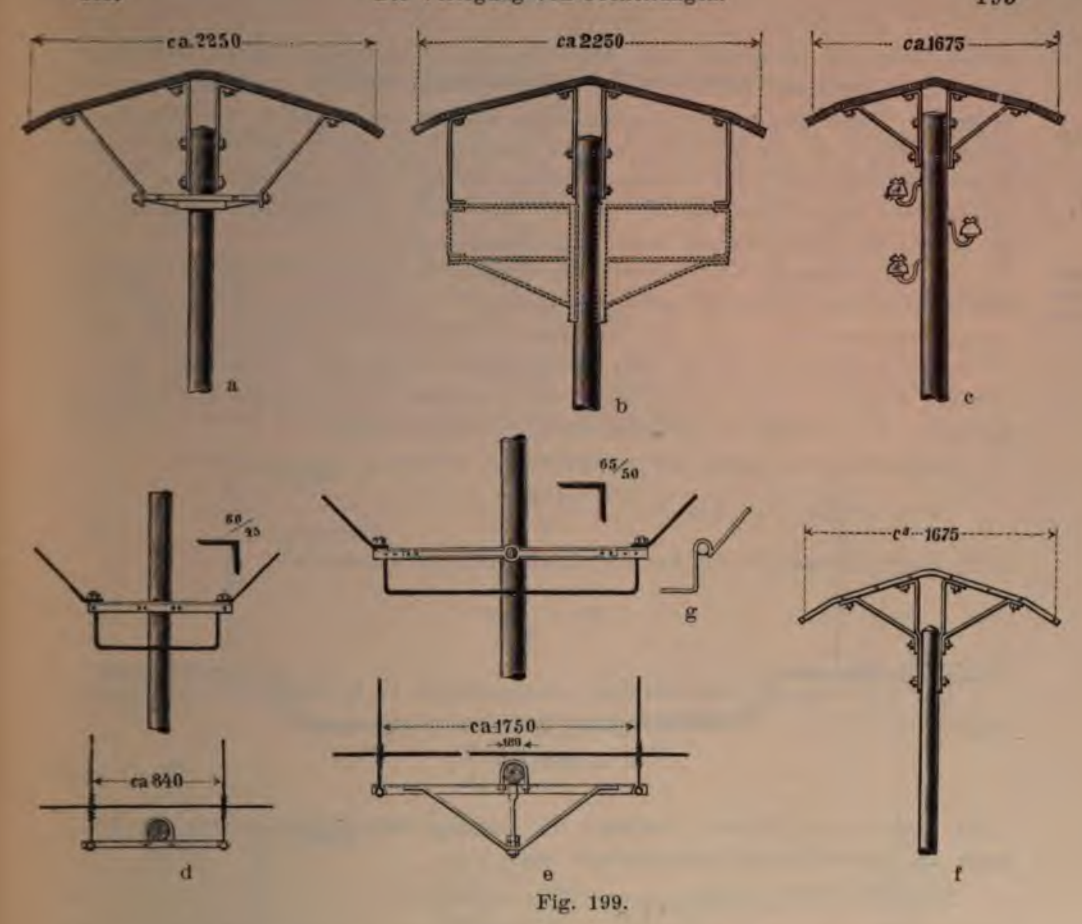


Fig. 199.

kann, so können die angegebenen Abstände noch wesentlich verringert werden.

Schutznetze sind zu erden und in leitende Verbindung untereinander zu bringen, sofern sie ununterbrochen fortlaufen. Es ist aber mehrfach auf die grossen Schwierigkeiten hingewiesen worden, welche einer guten Erdung so häufig entgegenstehen und kann daher in Würdigung dieser Thatsache an solchen Stellen die Erdung wegfallen, wo sie nicht gut erreicht werden kann. Dann müssen aber die Schutznetze gegen Erde isoliert werden und zwar in gleicher Weise wie die Leitungen.

Die Verlegung von Freileitungen.

131. Höhenmasse.

Freileitungen müssen so verlegt werden, dass sie dem Verkehr in keiner Weise hinderlich sind. Niederspannungsleitungen müssen daher in einer Höhe von mindestens 5 m über der Erdoberfläche angeordnet werden. Bei Wegübergängen wird diese Entfernung zweckmässig um 1 m erhöht. Da die Leitungen durchhängen, müssen die Befestigungsstellen um soviel höher angeordnet werden, wie der Durchhang beträgt, damit an der tiefsten Stelle die oben angegebenen Entfernungen innegehalten werden.

Bei der Verlegung von Freileitungen für Hochspannung genügen diese Abstände nicht. Sie müssen so hoch angebracht werden, dass sie vom Erd-

boden oder von Gebäuden aus ohne besondere Hilfsmittel nicht erreichbar sind. Dies wird auf freier Strecke ohne weiteres dadurch erreicht, dass die oben für Niederspannungen angegebenen Entfernungen auf 6, bei Wegübergängen auf 7 m als Minimum erhöht werden. In der Regel werden Hochspannungsleitungen aber bedeutend höher verlegt, da teilweise unter ihnen Schutznetze angeordnet werden müssen und dann von der Erdoberfläche bis zu diesen die angegebenen Masse innezuhalten sind.

132. Mastabstände. Bei Aufstellung von Holzmasten dürfen in geraden Strecken folgende Maximalabstände nicht überschritten werden. Für Leitungen mit einem Gesamtquerschnitt von 100 bis 200 $mm^2 = 40$ m, von 200 bis 300 $mm^2 = 35$ m, darüber = 30 m. Bei Kreuzungen mit anderen Leitungen, Eisenbahnen, Wegen u. s. w., sowie bei Kurven müssen die Abstände der Stangen geringer, den Umständen entsprechend, gewählt werden.

In Kurven darf aber der resultierende Drahtzug den Grenzwert

$$\frac{k\,W}{L}$$

nicht überschreiten, worin für den kreisförmigen Querschnitt

$$W = \frac{\pi}{32} D^3$$

zu setzen ist.

Der resultierende Zug aus den Leitungszügen zu beiden Seiten der Stange ergiebt sich[1] zu

$$R = 2\,P \cos\frac{\alpha}{2}.$$

α ist gleich dem Winkel, welchen die Leitung einschliesst, wenn der Eckmast als Scheitelpunkt angenommen wird.

Es ergiebt sich somit

$$\frac{k\,W}{L} = 2\,P \cos\frac{\alpha}{2}.$$

Aus der Entfernung der Mastabstände l und dem Kurvenradius r ergiebt sich

$$\cos\frac{\alpha}{2} = \frac{l}{2\,r}$$

und somit der äusserst zulässige Mastenabstand in Kurven

$$l = \frac{r\,k\,W}{P\,L}.$$

Bei Flussübergängen u. s. w., wo grössere Abstände der Stangen notwendig sind, müssen, ebenso wenn der Gesamtquerschnitt der Leitungen grösser als 300 m^2 ist, entweder Stangen von stärkeren Dimensionen oder gekuppelte Stangen verwendet werden.

Kurze Stangen untereinander zu einer längeren zusammenzusetzen ist nicht statthaft. Stangen mit geringerer Zopfstärke als 15 cm sind nur für Niederspannung bis 250 Volt gegen Erde zulässig. Für Hochspannung müssen die Stangen mindestens 18 cm Zopfstärke haben. Bei Verwendung eiserner Maste werden die Spannweiten im allgemeinen etwas weiter gewählt, je nachdem die Festigkeit derselben dies zulässt.

---

1) Vgl. S. 138 dieses Bandes.

Grosse Spannweiten in Freileitungen.

133. Verschiedene Arten der Überspannung.

Nicht immer ist es möglich, für die Freileitungen die nötigen Stützpunkte zu schaffen, insbesondere bei der Überbrückung von Flüssen und Schluchten. Entsprechend der grösseren Belastung genügt schon bei nicht allzu grossen Entfernungen eine Verstärkung des Leitungsmaterials nicht mehr, sondern man muss besondere Tragseile anordnen, die ab und zu mit der Leitung verbunden und darum gegen Erde ebenso sicher isoliert sein müssen, wie die Leitung selbst (Fig. 200).[1])

Nicht immer wird eine Überspannung möglich sein; man muss dann Kabel unterirdisch verlegen und diese beiderseits an die Freileitungen anschliessen unter Einschaltung geeigneter Blitzschutzvorrichtungen.[2]) Bei sehr

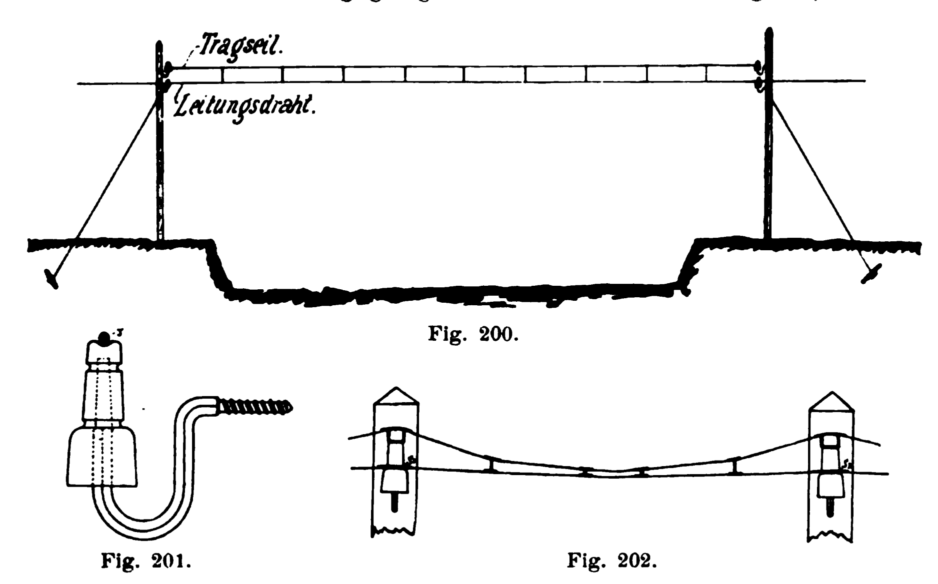


Fig. 200.

Fig. 201.

Fig. 202.

hohen Spannungen wird auch dieses Mittel versagen und es bleibt nichts anderes übrig, als auf der einen Seite der zu überspannenden Strecke den Strom auf eine Spannung herunter zu transformieren, für welche Kabel geliefert werden und auf der anderen Seite wieder auf die Streckenspannung zu bringen.

Um eine erhöhte Festigkeit in den Leitungen zu erzielen, ist vielfach versucht worden, eine Kombination von Stahl und Bronze, sogenannten Bimetalldraht,[3]) zu verwenden. Infolge des verhältnismässig hohen Leitungswiderstandes hat diese Methode aber nur geringe Anwendung gefunden. Die genannten Übelstände lassen sich aber, wie nachstehend beschrieben, auf einfache Art vermeiden.

Man verwendet[4]) einen in Fig. 201 dargestellten Isolator, welcher gestattet, auf der oberen Kopfnute einen Stahldraht T mit Oberbund zu befestigen. Dieser Trägerdraht wird mit einem Durchhang gespannt, welcher

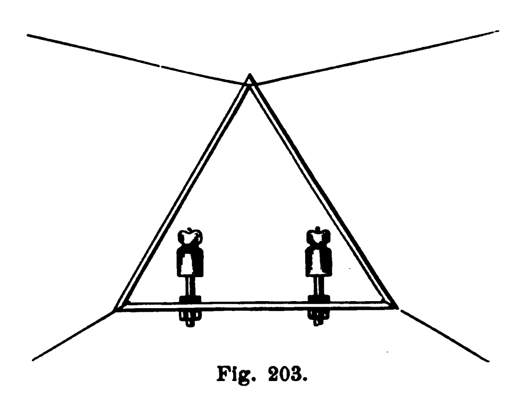
---

1) Gezeichnet nach einer Abbildung in MILLER: Versorgung der Städte mit Elektrizität.
2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 413.
3) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 157.
4) EA 1901, S. 1774.

nicht tiefer herabreicht, als die gerade Linie, welche man sich zwischen den Seitenbundnuten S_1 und S_2 (Fig. 202) gezogen denkt. An den letzteren wird dann die eigentliche Leitung aus Kupfer, Siliciumbronze oder Aluminium durch Seitenbund befestigt. Je nach den Mastabständen verbindet man die Leitung an mehreren Stellen mit dem Trägerdraht. Durch diese einfache Anordnung erzielt man ein solides und äusserst haltbares Freileitungssystem.

Auf freier Strecke gestattet diese Anordnung ausserdem die Aufstellung einer geringeren Anzahl von Masten, also grössere Spannweiten, so dass eine wesentliche Kostenersparnis eintritt. Der Stahldraht kann ferner als Prüf- oder Voltmeterleitung benutzt werden, wenn man die Verbindung zwischen Trag- und Leitungsdraht durch Isolierstücke herstellt, während sonst für diesen Zweck besondere Isolatoren und Leitungen erforderlich sind. Anderenfalls kann man aber den Tragdraht auch zur Leitung mitbenutzen und dementsprechend den Kupferdraht schwächer dimensionieren.

Als Isolierstücke liefert die Porzellanfabrik GEBRÜDER SCHÖNAU in Hüttensteinach i. Thür. kleine ei- oder melonenförmige Isolatoren, die mit Vorteil für diesen Zweck verwendet werden können. Der in Fig. 201 abgebildete Isolator wird von der gleichen Fabrik hergestellt, und zwar für Spannungen bis zu 5000 Volt und Leitungsquerschnitte bis 70 mm².


Fig. 203.

Vielfach können in den Tropen Maste überhaupt nicht gestellt werden; es ist dann die folgende Art der Leitungsbefestigung üblich, die aber nur Verwendung finden kann, wenn genügend Stützpunkte (Bäume, Felsen u. s. w., wenn auch in grösserer Entfernung) vorhanden sind. Die Verlegung erfolgt auf Isolatoren, welche von dreieckigen Bügeln getragen und welch letztere mit Hilfe von stählernen Spanndrähten aufgehangen werden. Sie sind in Fig. 203 erläutert. Durch diese Anordnung ist es möglich, auch da Stützpunkte zu schaffen, wo man nicht mit anderen Hilfsmitteln hingelangen kann, und die Leitung selbst läuft ohne Krümmung oder auch in beliebigen Kurven ihren Weg.

134. Beschreibung zweier Überspannungen von grosser Spannweite.

Eine Stromleitung von grosser Spannweite wurde kürzlich in Amerika über den Monongahelafluss verlegt. Die Entfernung der beiden Leitungstürme, welche zu jeder Seite des Flusses errichtet sind, beträgt rund 300 m. Die zwischen ihnen gespannte Leitung besteht aus zwei Aluminiumseilen, welche an den aus Stahl konstruierten Türmen fest verankert sind. Den angestellten Berechnungen wurden folgende Verhältnisse zugrunde gelegt. Die Netzspannung beträgt 250 Volt, der zu übertragende Strom 800 Amp. und der zugelassene Spannungsabfall 40 Volt. Als maximaler zulässiger Durchhang werden bei 100° C. 10 m, für zu erwartende Windpressung 190 kg pro Quadratmeter, für die niedrigste Temperatur — 7° C. und für die zu erwartende Eisschicht auf den Kabeln eine solche von 6 mm Dicke angenommen. Die zulässige Zugspannung des verwendeten hartgezogenen Aluminiumdrahtes wurde zu 2500 kg pro Quadratcentimeter ermittelt, die Leitfähigkeit zu 63 verglichen mit derjenigen von Kupfer, wenn dessen Leitfähigkeit mit 100 fest-

gesetzt wird und der Ausdehnungskoeffizient zu 0·0000218 pro Grad Celsius. Auf Grund der angestellten Berechnung fand man, dass der von einem Seil ausgeübte Zug im Maximum auf 8200 kg steigen kann, d. h. dass der Leitungsturm mit einer Zugspannung von $4 \times 8200 = 32800$ kg beansprucht wird. Das Verfahren der Leitungsverlegung war sehr einfach. Die Seile wurden auf grosse Haspel gewickelt, welche auf der einen Seite in einem gut verankerten Rahmen drehbar angeordnet waren. Der Haspel war mit einer Bremse oder doch genügender Reibung versehen, um jederzeit leicht angehalten werden zu können, wenn die Spannung des Kabels nachliess. Das freie Ende des Kabels wurde dann über eine nahe der Spitze des Leitungsturmes angebrachte Rolle gebracht und mittels eines Hanfseiles, welches um eine auf der anderen Seite angebrachte Trommel lief, herübergezogen. Wenn sich nur noch einige wenige Windungen des Kabels auf dem Haspel befanden, wurde ein Tau mit dem Kabel verknüpft und bis zur endgültigen Verankerung des Kabels zum Halten verwendet. Um ein Kabel vollständig zu spannen, waren ungefähr 30 Minuten erforderlich.

Interessanter ist die Konstruktion der Hochspannungsfernleitung über die Meerenge von Carquinez,[1]) einem tiefen Kanal mit starker Strömung, welcher an der engsten Stelle über 975 m breit ist und dessen Durchkreuzung immerhin Schwierigkeiten bereiten musste. Zwei Methoden konnten dafür in Betracht kommen, und zwar entweder die Linienspannung von 60000 Volt, welche vorgesehen war, auf eine für Unterseekabel geeignete Spannung herab und auf der anderen Seite wieder auf die normale Spannung hinauf zu transformieren, oder eine Luftüberführung über den Kanal herzustellen. Da im ersteren Falle Energieverluste zu berücksichtigen waren, beschloss man die zweite Methode zu wählen.

Um ein bequemes Durchfahren der Schiffe zu ermöglichen, stellte die Regierung in erster Linie die Bedingung, dass die Überführung über dem höchsten Wasserstand eine lichte Höhe von 60 m haben müsste. Es wurde eine Konstruktion nach Art der Hängebrücken gewählt, da die Windgeschwindigkeit an der ausführenden Stelle zeitweise 120 km pro Stunde beträgt. An den vorteilhaftesten Punkten des Terrains mit grösstmöglichster Höhe und möglichst kurzer Spannweite wurden aus Stahl konstruierte Türme errichtet. Der Turm auf der Nordseite musste 68 m, der auf der Südseite dagegen brauchte nur 20 m hoch sein, wobei ein entsprechender Durchhang berücksichtigt war. Die Spannweite ergab 1350 m, welche wohl ihresgleichen bisher noch nicht erreicht hat. (Die Brücke Brooklyn—Newyork hat 488 m Spannweite.) Der Gesamtabstand von einer Kabelverankerung zur andern beträgt sogar 1890 m.

Das Kabel, welches sowohl als Leitungs- als auch als Spannkabel dient, ist einer der wichtigsten Teile der ganzen Überspannung. Es setzt sich aus 19 Drähten, die aus galvanisiertem Messerstahl bestehen und ein Seil von 22·2 mm Durchmesser bilden, zusammen. Vier solcher Kabel wurden verlegt, wovon das eine als Reserve für die drei zur Anwendung kommenden bestimmt ist. Die Bruchfestigkeit des einzelnen Kabels ist 44450 kg, das Gesamtgewicht jeder Überspannung beträgt 3210 kg, so dass sich hieraus ein vierfacher Sicherheitsfaktor, bei einem Durchhange von 30 m ergiebt. Die Kabel sind, wie bei der Spannbrückenkonstruktion, nicht starr an den

1) Electrical World and Engineer, 8. Juni 1901.

Türmen befestigt, sondern sie sind auf diesen über Rollen und über diese hinweg an beiden Enden zu einer Verankerung geführt, an der ein Zug von 12000 kg auf jedes Kabel ausgeübt wird, während der auf die Turmauflagerungen wirkende Druck je 3175 kg beträgt. Die Verankerungen bestehen aus schweren, massiven Blöcken, welche tief in die Erde versenkt sind und durchgehende Ankerbolzen besitzen.

Es sind zwei Arten von Isolatoren bei dieser Überführung verwendet, und zwar Sattelisolatoren (Fig. 204) auf den Türmen, die das Gewicht der Kabel tragen, sowie Spannisolatoren (Fig. 205), welche die Kabel gegen die Verankerungen isolieren und den ganzen Zug aufnehmen. Die Sattelisolatoren bestehen aus glasiertem Porzellan und wurden durch Zusammenkitten von vier einzelnen Porzellanschalen und einem starken konischen, in die mittlere derselben eingeschwefelten Stahldübel gebildet; über diesen Stahldübel greift die entsprechend konisch gestaltete innere Porzellanschale. Das Gewicht

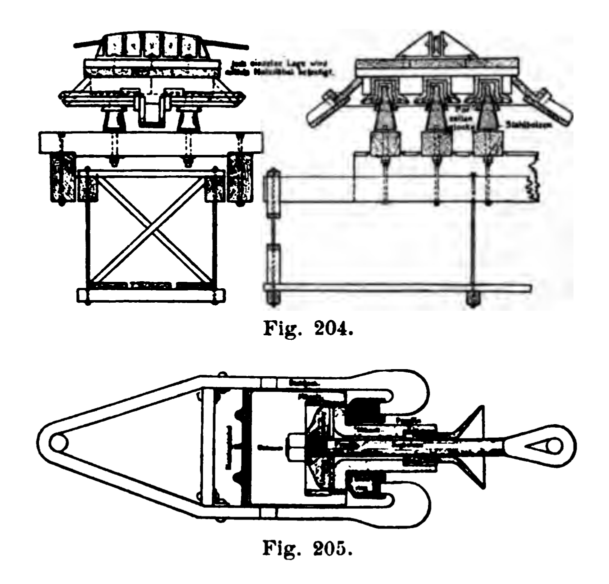


Fig. 204.

Fig. 205.

dieses Isolators beträgt 34 kg ausschliesslich des Dübels; der Durchmesser am äusseren Mantel misst 43 cm. Sechs solcher Isolatoren in einer Gruppe tragen eine hölzerne Plattform mit sechs tiefen, über die Körper der Isolatoren greifenden Löchern. Ein Regendach schützt die Isolatorengruppe gegen Treibregen, eine Rinne dient zur Ableitung des sich ansammelnden Wassers. Oben auf der Plattform befindet sich das gusseiserne Lagerstück, welches fünf in einer Reihe drehbar angeordnete genutete Stahlrollen trägt. Das Kabel ruht frei auf diesen Rollen, so dass eine Bewegung desselben nicht gehindert wird.

Die Konstruktion der Spannisolatoren brachte erheblichere Schwierigkeiten. Es stellte sich heraus, dass die Porzellanfabrikanten die in Bezug auf Festigkeit geforderten Bedingungen nicht erfüllen konnten und man wählte Mikanit. Die Durchschnittzeichnung Fig. 205 veranschaulicht die Konstruktion des Isolators deutlich. Das konisch gestaltete Porzellanrohr sichert eine reichliche Oberflächenisolation zwischen dem Zugbolzen und dem Stahlring, während das im Innern des Kupferbehälters befindliche Öl ausser der Isolation gleichzeitig die Entstehung eines Lichtbogens zwischen gegenüber-

liegenden Teilen verhindert. Die im Flansch der Mikanitbuchse vorgesehenen Aussparungen dienen zur Vergrösserung des Oberflächen-Isolationsweges, was bei der in Anwendung kommenden hohen Spannung selbst unter Öl geboten erscheint. Der Sicherheit wegen sind zwei dieser Spannisolatoren in Serie geschaltet, um beim Durchschlagen des einen noch den anderen als Schutz gegen Erdschluss zu haben. Zur Vermeidung von Wasseransammlungen an der Oberfläche des Isolators ist über jedem Satz ein Gehäuse gebaut, dessen Vorderseite mit einer Glasscheibe versehen ist. Jedes Kabel kann durch Hochspannungsschalter zwecks erforderlich werdender Reparaturen ausser Betrieb gesetzt werden, wobei in Anbetracht der starken statischen Wirkungen die vorherige Erdung des Kabels bewirkt wird.

135. Entfernung der Leitungen unter sich.

Die Entfernungen der Freileitungen unter sich richten sich ganz nach der Betriebsspannung, jedoch ist als geringste 30 cm anzunehmen, da darauf Rücksicht zu nehmen ist, dass die in grossen Abständen gespannten Leitungen hin- und herpendeln.[1]) Bei Spannungen von 250 Volt bis 5000 Volt werden 40 und von 5000 bis 10000 Volt 50 cm innegehalten. Übersteigt die Betriebsspannung 10000 Volt, so werden wohl die Abstände noch erweitert (vgl. z. B. Fig. 158 u. 161), indessen genügen selbst für die höchsten in der Praxis vorkommenden Spannungen 60 bis 70 cm.[2])

Gestänge auf der Strecke.

136. Gestängeverstärkungen.

Bei der Linienführung ist nun zu berücksichtigen, dass auf gerader Strecke sich die Leitungszüge gegenseitig aufheben. Dies geschieht um so mehr, je gleichmässiger dieselben gespannt sind. Maste und Gestänge werden daher so gewählt, dass sie auf alle Fälle in der Lage sind, die Differenz aus den seitlichen Zügen aufzunehmen. Andere Dispositionen müssen sofort getroffen werden, wenn die Leitung in Kurven läuft, oder überhaupt, wie an Endpunkten, nur einseitige Züge auftreten. In solchen Teilen müssen die Tragkonstruktionen verstärkt und Abspannvorrichtungen vorgesehen werden.

Holzmaste werden von stärkerem Durchmesser gewählt oder zu zweien nebeneinander angeordnet und durch 4 bis 5 Bolzen miteinander verbunden. Eine andere Anordnung, die allerdings in Deutschland selten beobachtet wird, besteht darin, dass zwei Maste mit den Zöpfen gegeneinander gelegt und verbolzt werden, wogegen die Fussenden 1 bis $1^1/_2$ m auseinander ins Erdreich gebettet werden, so dass sie ein offenes Dreieck (Doppelständer Fig. 206a) bilden. Sind die Leitungen nicht sehr stark — die seitlichen Züge, die in Kurven auftreten, sind trotzdem ziemlich gross — so kann man mit einer einfachen Stange eventuell auskommen, wenn man sie schräg, und zwar der Zugrichtung entgegengesetzt, aufstellt. Beim Spannen der Leitungen wird sie dann gerade geholt. Auch an anderen Stellen werden die Stangen gern „auf Anzug" gestellt.

Für die Festigkeit der Doppelständer gilt:

$$k = \frac{P\,L \cos a + P\,e \sin a}{e\,Q} + \frac{P\,L\,(L_1 - L)}{L_1\,W},$$

wenn Q den Mastquerschnitt am Fusspunkt bedeutet. Die übrigen Zeichen haben die in Fig. 206a erkennbare Bedeutung.

1) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 134. Abtrieb der Leitungen.
2) Hdb. VI, 1, S. 377: Verluste an Freileitungen bei sehr hohen Spannungen.

An den Doppelständern müssen die Isolatoren übereinander angeordnet werden, lieber stellt man sie nebeneinander und zieht dann das in Fig. 206 b wiedergegebene Doppelgestänge vor, auf dessen oberer Querverbindung die Isolatoren befestigt werden.

187. Verankerungen und Streben. Statt doppelter Stangen werden häufig Verankerungen und Streben verwendet.

Erstere bestehen meistens aus verzinktem Eisendrahtseil, welches am Mast, etwa in $^2/_3$ seiner Höhe so befestigt wird, dass es nicht abrutschen kann; im Erdboden wird es in einer Tiefe von etwa 1 m verankert, sei es durch ein quergelegtes Holz, sei es durch Erdbohrer. Mit Hilfe eines zwischen

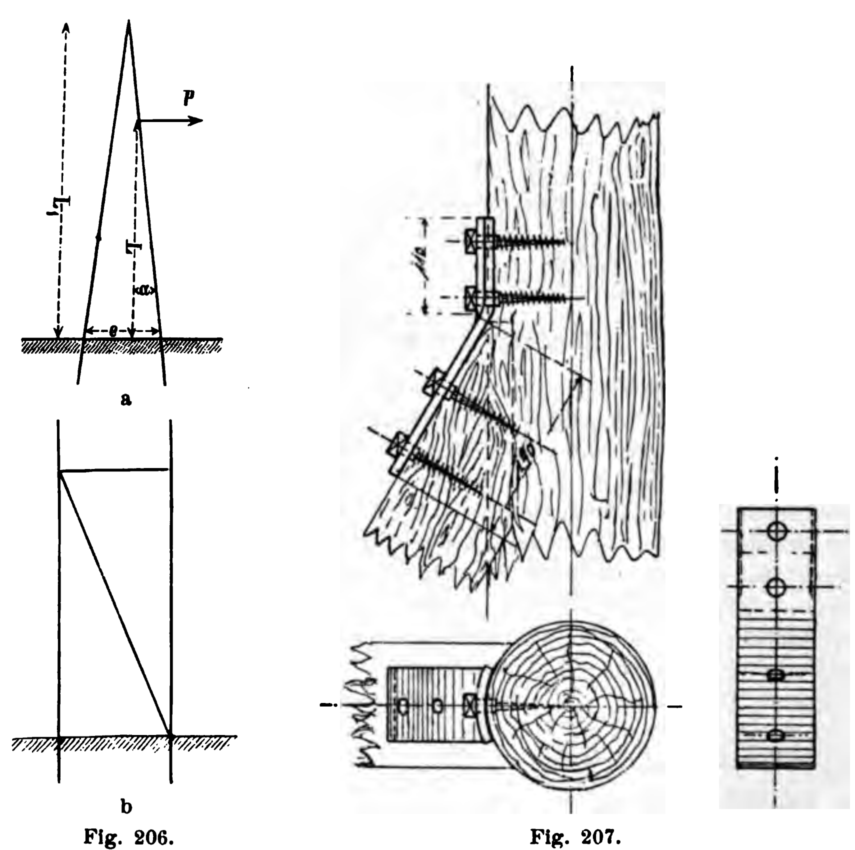


Fig. 206. Fig. 207.

die einzelnen Drähte des Seiles gesteckten Knebels wird es dann verdrillt und hierdurch der Mast angespannt.

Streben werden in der Zugrichtung gegen den Mast gelegt und mit ihm verbolzt. Der Mast darf aber nicht eingeschnitten werden. Eventuell kann durch einen übergelegten eisernen Winkel die Verbindung hergestellt werden (Fig. 207). Statt der Streben werden bisweilen in Kurven die Doppelständer (Fig. 206) verwendet und diese so gestellt, dass die Richtung des resultierenden Zuges in die Mitten beider Stangen fällt. Nun ist es häufig nicht nur in Kurven, sondern auch in geraden Strecken erforderlich, die Maste zu verankern, nämlich dann, wenn häufig auftretende seitliche Winde die Strecke sehr stark angreifen. An besonders ungünstigen Stellen, insbesondere an Strassen und Wegübergängen, werden daher beiderseits sogar Verankerungen

angeordnet. Es genügt jedoch auch in solchen Fällen an jedem 5. bis 10. Mast die Verstärkung vorzunehmen.

Für die Festigkeit des Ankers gilt das Folgende: Der Resultierenden des Leitungszuges P muss durch die Gegenkraft S das Gleichgewicht gehalten werden. Diese ist die Horizontalkomponente des vom Anker ausgeübten Zuges R; die Vertikalkomponente fällt mit der Richtung der Stange zusammen und beansprucht sie auf Zerknickung.

Die Beanspruchung der Stange und Anker ergiebt sich zu:

$$k = \frac{P L_1}{W} + \frac{\operatorname{cotg} \alpha \left(1 + \frac{3 L_1}{2 L}\right) P}{Q} \text{ kg für } 1 \text{ cm}^2,$$

worin Q wiederum den Stangenquerschnitt bedeutet und die übrigen Zeichen in Fig. 208 ihre Erklärung finden.

Der Anker selbst wird wie folgt beansprucht:

$$k_1 = \frac{P\left(1 + \frac{3 L_1}{2 L}\right)}{q \sin \alpha} \text{ kg für } 1 \text{ cm}^2,$$

worin q den Querschnitt des Ankers bedeutet.

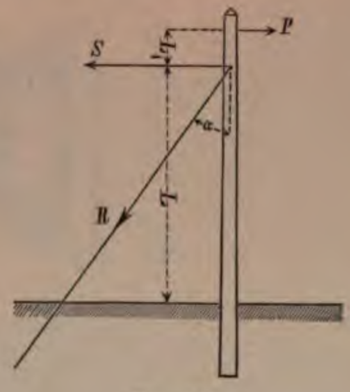


Fig. 208.

Genau die gleiche Beanspruchung tritt in einer Strebe auf, die anstatt des Ankers verwendet wird.

Abspanndrähte bedingen nun, wie an anderer Stelle auseinandergesetzt,[1]) gewisse Gefahren dadurch, dass sie, wenn Hochspannung auf den Gestängen geführt wird, gefährliche Spannungen gegen Erde annehmen können. Sie werden daher gegen den Mast isoliert durch Zwischenschaltung von Porzellanstücken oder Abspannung an Isolatoren. Sehr vorteilhaft ist die Verwendung der in Fig. 209 gezeigten, von der Harburger Gummikamm-Compagnie gefertigten Abspannisolatoren. Sie haben den Vorzug, dass sie gleichzeitig als Spannschlösser dienen. Die Isolierung erfolgt durch die Umpressung des mit Innengewinde versehenen Bolzens mit Eisengummi. Wo Ankerdrähte an brennbaren Gebäudeteilen befestigt werden sollen, ist es empfehlenswert, sie auch gegen diese zu isolieren, oder sie ausserhalb dieser zu erden. Im übrigen sind entgegen vielfacher Behauptungen die Ankerdrähte selten die Ursache des in Hochspannungsanlagen beobachteten Abbrennens der Holzmaste. Vielmehr sucht sich der Strom in der Regel seinen Weg nach der Spitze des Mastes, von wo er in dem weichen Mark einen bequemen Weg zur Erde findet und dann von der Spitze aus abbrennt.

138. Bezeichnung der Maste.

In ausgedehnten Fernleitungen ist es dringend erforderlich, die einzelnen Maste zu bezeichnen, und zwar geschieht dies durch fortlaufende Nummerierung etwa von der Zentrale aus und bei Holzmasten durch Angabe der Art der Imprägnierung, die durch einen Buchstaben erfolgt, und zwar bedeuten C = Kupfervitriol, Z = Zinkchlorid, H = Verfahren nach Hasselmann u. s. w., K = Teeröle (karbolsäurehaltig).

---

1) Hdb. VI, 2: Persönliche Sicherheit.

In Anbetracht einer sorgfältigen Überwachung kann auch sehr empfohlen werden, das Datum der Einsetzung am Holzmast einzubrennen.

Maste oder Schutzverkleidungen von Leitungen, welche eine absolute Spannung von mehr als 500 Volt führen, müssen durch einen deutlich sichtbaren roten Zickzackpfeil (Blitzpfeil) gekennzeichnet sein.[1])

139. Einsetzen der Maste. Je nach Beschaffenheit des Bodens und der Länge der Maste sind dieselben einzugraben, und zwar in der Regel etwa mit $^1/_5$ ihrer Länge, mindestens aber 1·5 bis 2·5 m tief und darauf gut zu verrammen. In weichem Boden sind die Stangen einzubetonieren. Gern wird ihnen im Erdreich eine grössere Oberfläche, etwa durch Anbringen von Wellblech oder dergleichen gegeben, damit sie den seitlichen Zug besser aufnehmen können.

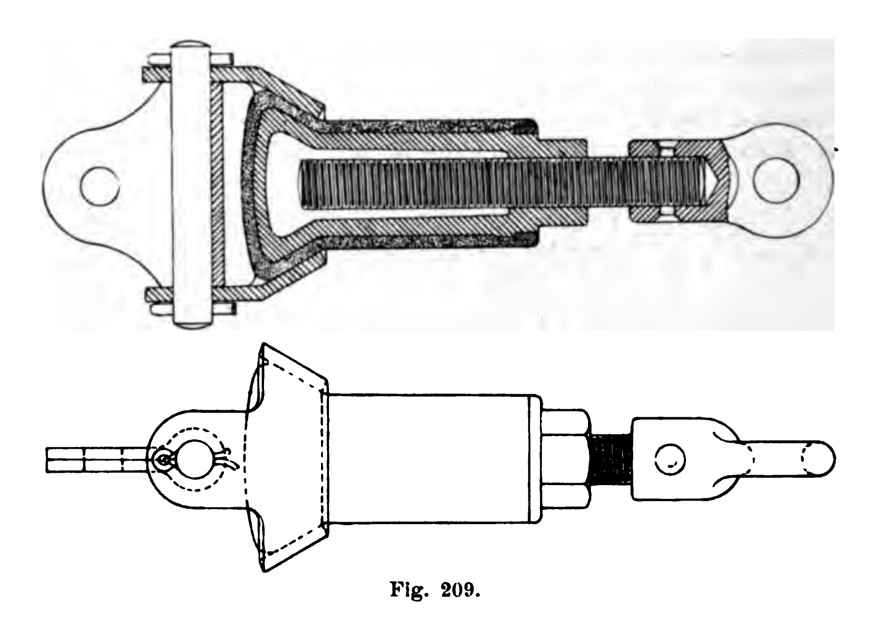


Fig. 209.

Eventuell kann auch durch die Anhäufung grösserer Steine die Festigkeit erhöht werden.

140. Blitzschutz für Freileitungen. Freileitungen sind,[2]) den örtlichen Verhältnissen entsprechend, durch Blitzschutzvorrichtungen zu sichern, die auch bei wiederholten Entladungen wirksam bleiben. — Diese „Blitzschutzvorrichtungen" haben aber nicht den Zweck, direkte Blitzschläge unschädlich zu machen, ihre weit wichtigere Aufgabe ist die Unschädlichmachung mannigfacher atmosphärischer Entladungen auch ohne direkte Blitzerscheinung, sowie der im Betrieb einer Hochspannungsanlage auftretenden Überspannungen.[3])

Allgemein gesagt scheinen sich für Hochspannungsanlagen Hörnerblitzableiter[4]) und für Niederspannung Schutzvorrichtungen mit magnetischer Funkenlöschung[5]) am besten zu bewähren. In welcher mannigfachen Art die Vorschrift, dass die Schutzvorrichtungen auch nach erfolgter Entladung

1) Näheres siehe C. L. Weber: Erläuterungen, 6. Aufl., S. 85, Anm. 2.
2) § 23f Niederspannung und § 23o Hochspannung der Sicherheitsvorschriften.
3) Hdb. VI, 1, S. 376 f.
4) Hdb. VI, 1, S. 406 f.
5) Hdb. VI, 1, S. 401 f.



Fig. 210.

wirksam bleiben sollen, zu lösen versucht worden ist, wurde an anderer Stelle [1]) ausführlich behandelt.

An welchen Stellen einer Freileitung eine Schutzvorrichtung eingebaut werden soll, lässt sich ohne das sorgfältigste Studium an Ort und Stelle kaum feststellen, da auch die klimatischen und Bodenverhältnisse, Bewaldung u. s. w. von der einschneidendsten Bedeutung sind. Während manche ausgedehnten Fernstrecken unter Entladungen fast gar nicht zu leiden haben, sind andere zeitweise genötigt, den Betrieb einzustellen, insbesondere an schwülen Sommertagen.

In der Regel werden die Schutzvorrichtungen am Beginn und am Ende der Strecken angebracht und weitere auf der Strecke verteilt.[2]) Vor die betreffenden zu schützenden Stromverbraucher sind Drosselspulen zu schalten.

141. Anbringung von Apparaten in Freileitungen.

Die Apparate, welche in Freileitungen am häufigsten einzuschalten sind, sind Sicherungen und Schalter. Die ersteren sind an Abzweig- und Verteilungspunkten erforderlich, die letzteren werden für Hochspannung durch § 23 *l* der Sicherheitsvorschriften verlangt.

Die näheren Angaben für Sicherungen sind bereits im Hdb. VI, 1, S. 315 f., für Schalter im Hdb. VI, 1, S. 191 f. gegeben.

Sie müssen so angeordnet werden, dass sie ohne besondere Hilfsmittel nicht erreichbar, also in gewisser Höhe oder gegen Berührung geschützt angebracht sind (vgl. Fig. 256, Hdb. VI, 1). Ersteres ist jedoch nicht immer wünschenswert. Man bringt diese Apparate gern in handliche Höhe, muss aber dann zum persönlichen Schutz verschlossene sichere Behälter verwenden, in denen dieselben montiert werden (Fig. 210).

In erhöhtem Masse ist der gleiche Schutz auch da anzubringen, wo Teile der Freileitungen in von Gebäuden erreichbarer Nähe vorbeiführen.

Freileitungsmaterial der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

142. Allgemeines.

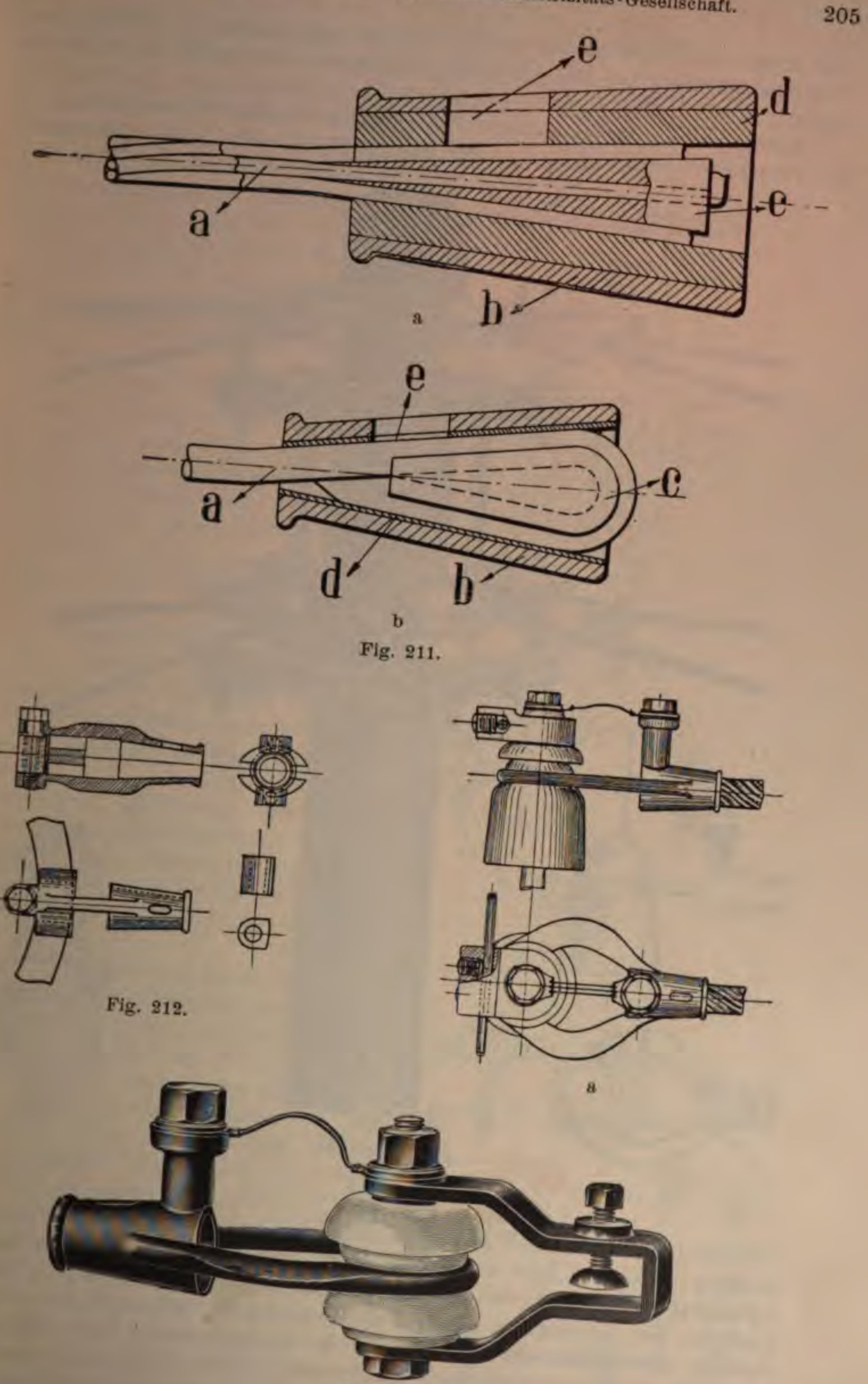
Von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft ist das im nachstehenden beschriebene Installationsmaterial für die Verwendung von Aluminium- als auch Kupferleitungen konstruiert worden; es zeigt einige charakteristische Einzelteile, vermöge deren jede der beiden Leitungsarten ohne Änderungen angewendet werden kann.

Man kann nicht allein Zentral-Verteilungsstellen, sondern auch Abzweigungen, Übergangsstellen und Hausanschlüsse montieren, und zwar an Rohr-, Gitter- und Holzmasten, auf Dächern und an Hauswänden. Bei Übergängen von unter- zu oberirdischen Leitungen oder umgekehrt treten einige Modifikationen ein, unter denen aber die Einheitlichkeit des Materials nicht beeinträchtigt wird. —

Bei der Konstruktion des Materials ist darauf Rücksicht genommen, die naturgemäss auftretenden Zugbeanspruchungen derart gleichmässig innerhalb der Befestigungspunkte einer Verteilungsstelle zu gruppieren, dass weder Isolatorbrüche, noch Verzerrungen des Systems, wie solche bei einseitiger Beanspruchung möglich sind, vorkommen können. Im weiteren musste man

1) Hdb. VI, 1: Schutzvorrichtungen gegen Überspannungen und atmosphärische Entladungen, S. 375.

2) Hdb. VI, 1, S. 421, 424, 426.



a

b

Fig. 211.

Fig. 212.

a

b

Fig. 213.

aber auch, mit Rücksicht auf den an und für sich unschönen Anblick eines Oberleitungsnetzes, für ein gefälliges und leichtes Aussehen des Materials sorgen.

143. Anschluss- und Abzweigstellen.

Anschluss- und Abzweigstellen freigespannter Drähte müssen nach § 13 der Vorschriften des V. D. E. von Zug entlastet sein. Diese Zugbean-

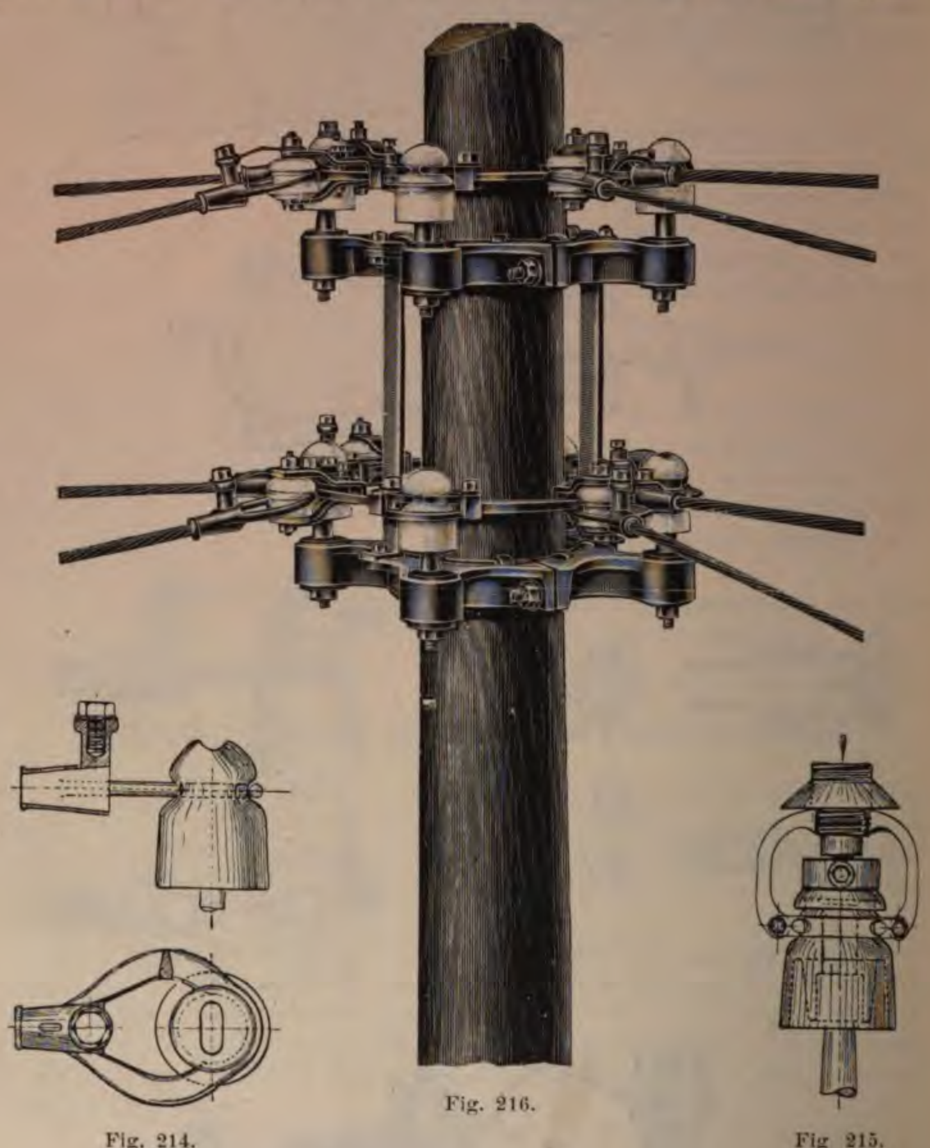


Fig. 214. Fig. 216. Fig. 215.

spruchungen können aber je nach Grösse des zu verlegenden Querschnittes ziemlich bedeutend sein und es ist klar, dass die ganze Konstruktion des Systems von der Form des Anschlusses erheblich beeinflusst wird. Hierbei kam nun der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft der Besitz eines älteren Patentes sehr zu statten, wobei durch eine Keilverbindung neben einem absolut sicheren Kontakt gleichzeitig auf äusserst einfache Weise die Abspannung der Leitung ermöglicht wird. In Fig. 211 a ist diese Konstruktion dargestellt,

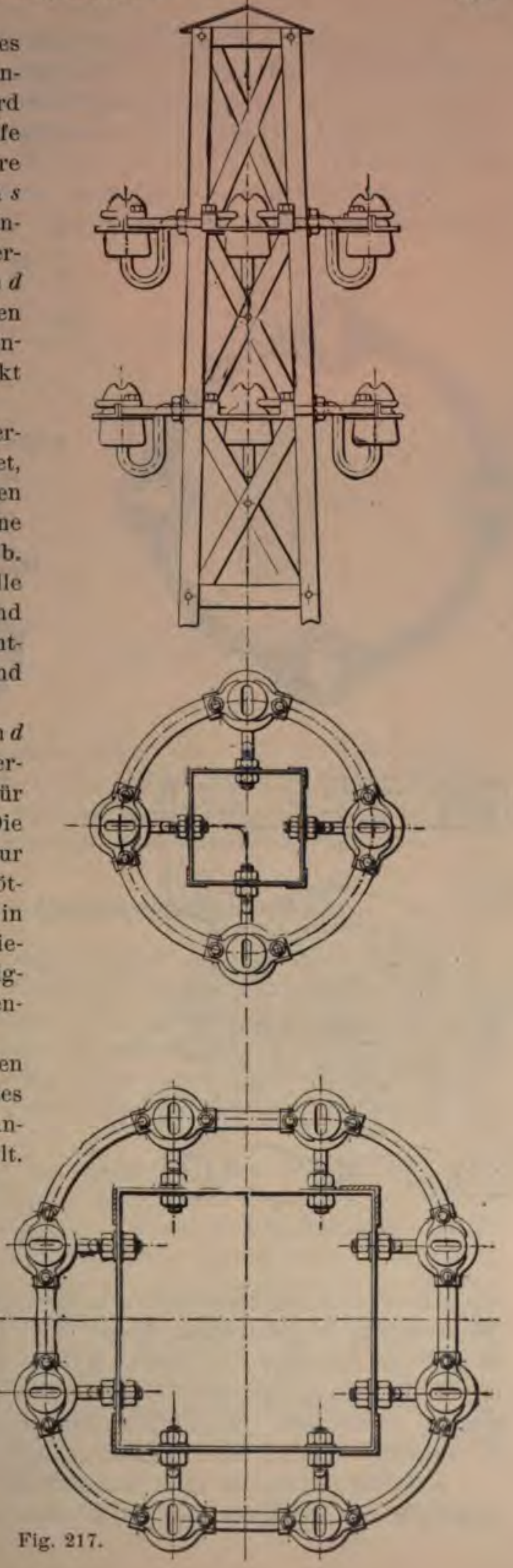
und zwar bei Befestigung eines siebenadrigen Seiles *a* in einem Anschlussstück. Das Seilende *a* wird in die kleinere Öffnung der Muffe eingeführt, wobei ein die mittlere Ader aufnehmender konischer Dorn *s* in entgegengesetzter Richtung eingetrieben wird. Das Seil wird hierdurch gegen die Wände der Buchse *d* gepresst, so dass ein Herausgleiten verhindert und gleichzeitig ein inniger von Zug entlasteter Kontakt erreicht ist.

Wird bei schwächeren Querschnitten ein Einzeldraht verwendet, so bedient man sich der flachen Muffen mit ebensolchen Keilen. Eine solche Verbindung zeigt Fig. 211 b. Hier wird der Draht um eine Rille des flachen Keiles *c* gelegt und gespannt, wodurch wiederum Entlastung der Verbindungsstelle und guter Kontakt eintritt.

Eine Anzahl von Einsatzbuchsen *d* ermöglicht die Verwendung der verschiedensten Leitungsquerschnitte für ein und dasselbe Anschlussstück. Die Öffnung *e* in letzterem dient zur eventuellen Einführung der Lötmasse. Das Anschlussstück *b* hat in seiner weiteren Ausbildung verschiedene Formen, die dessen Vielseitigkeit für alle Anschlussarten erkennen lassen.

Soll die Leitung direkt an den Sammelring eines Verteilungspunktes angeschlossen werden, so wird ein Anschlussstück nach Fig. 212 gewählt.

Der Anschluss an einen solchen Ring kann unter Zwischen schaltung einer Schmelzsicherung erfolgen; das Anschlussstück erhält dann die Ansicht von Fig. 213 a, wobei ein Glocken- oder ein Shakle-Isolator (Fig. 213 b) mit doppelter Glocke eingefügt ist, um bei Messungen eine gute Isolation zwischen Leitung und Sammelring zu haben.


Fig. 217.

Zu erwähnen ist dann noch die Form des Anschlusses für Einzelabzweigungen, und zwar mit durchgehender Leitung (Fig. 213), mit Endabspannung (Fig. 214) und mit Stöpselsicherung (Fig. 215). Die am häufigsten vorkommende Anwendung dürfte diejenige des Verteilungspunktes an Masten Fig. 216 u. 217 sein.

144. Sammelringe. Die Anordnung der Sammelringe ermöglicht den Anschluss von 16 Freileitungen nach nahezu jeder Richtung. Die Sammelringe, Fig. 218, werden

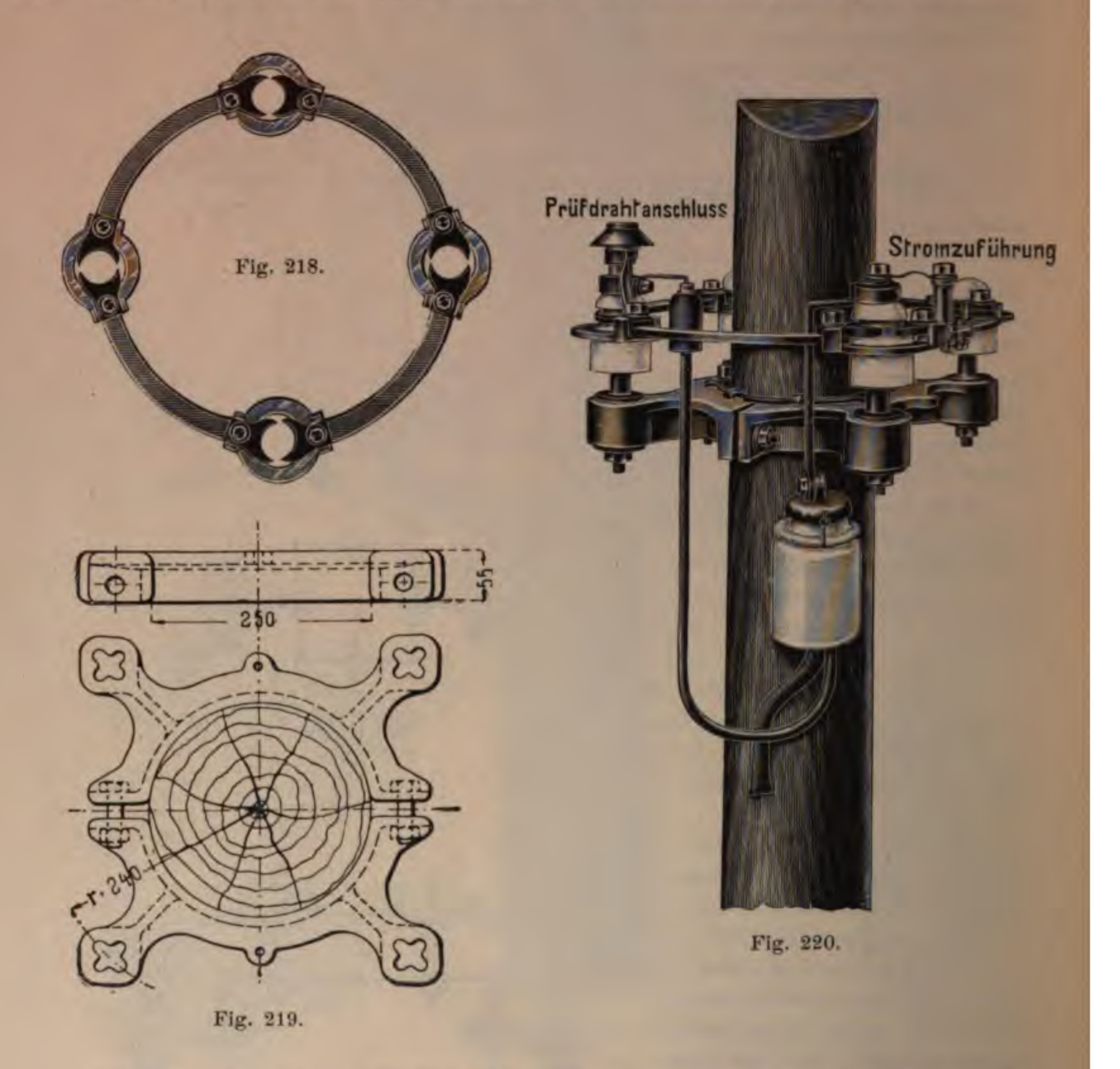


Fig. 218.

Fig. 219.

Fig. 220.

aus einzelnen Kreisabschnitten zusammengesetzt und auf Isolatoren befestigt, die ihrerseits in gusseiserne Ringe (Fig. 219) eingeschraubt werden, sofern es sich um Montage an runden Masten handelt. Diese gusseisernen Ringe lassen sich mit geeigneten Einsatzstücken für alle vorkommenden Mastdurchmesser verwenden. In Gittermasten werden die Isolatoren, welche die Sammelringe tragen, direkt mittels gebogener Stütze befestigt (siehe Fig. 217).

Soll der Strom aus einer Kabelstrecke zur Oberleitung übergehen oder umgekehrt, so geschieht dies für je einen Leiter durch einen Kabelschuh mit

Schutzglocke, Kupferschiene, Anschlusskappe, Sicherung und Klemme (siehe Fig. 220). Zum Schutze gegen Regen ist der Kabelschuh mit einer Porzellanglocke bekleidet; die Kupferschiene ist isoliert.

Der Prüfdraht wird am Kabelschuh mittels Bleikabels abgezweigt und zur Prüfdrahtklemme geleitet. Bei der Montage ist darauf zu achten, dass die

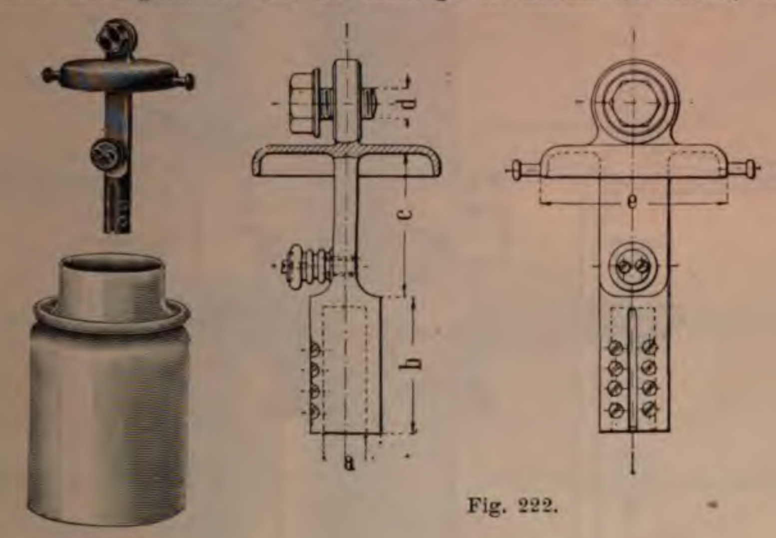


Fig. 221.

Fig. 222.

Hartgummiglocke zuerst auf das Bleikabel geschoben, dann das Stück Kupferdraht eingelötet und schliesslich die Glocke auf die Schraube aufgesetzt wird. Ein herausgenommener Kabelschuh wird in Fig. 221 veranschaulicht, während in Fig. 222 derselbe mit Prüfdrahtanschluss dargestellt ist.

Freileitungsmaterial der Siemens-Schuckert Werke.

145. Material für Verteilungsmaste.

Auch von den Siemens-Schuckert Werken ist ein neues System für Freileitungen insbesondere deren Verteilung ausgearbeitet worden, welches sich hauptsächlich dadurch auszeichnet, dass die Sicherungen unterhalb der Freileitungen angeordnet sind, so dass sie bedient werden können, ohne mit stromführenden Leitungen in Berührung zu kommen. Die Sicherungen selbst, die eine sichere Löschwirkung mit grosser Handlichkeit vereinen, sind bereits früher beschrieben.[1])

Das System (Fig. 223) besteht im wesentlichen aus zwei Ringen, von denen der obere, der Abspannring, entsprechend seiner Beanspruchung kräftig, der untere Sicherungsring leichter, aber in der gleichen Konstruktion wie der obere ausgebildet ist. Beide bestehen aus geteilten sternförmig gestalteten Gusseisenkörpern, deren Arme durch schmiedeeiserne Ringe verbunden sind. Besondere Stellkeile gestatten die Ringe in beliebiger Höhe an den Masten anzubringen, es ist daher auch möglich, den Sicherungsring unabhängig vom Abspannring in einer solchen Entfernung von den Leitungen anzuordnen, dass die unbeabsichtigte Berührung dieser vermieden und vom Erdboden aus eine bequeme Bedienung erreicht werden kann, ohne übermässig hohe Leitern benutzen zu müssen.

1) Hdb. VI, 1, S. 363 (Fig. 313).

Die Abspannringe werden in zwei verschiedenen Grössen hergestellt, ein kleiner für 4 × 2 Leitungen und Maste von 105 bis 130 mm Durchmesser und ein grosser für 4 × 3 Leitungen und Maste von 150 bis 225 mm Durch-

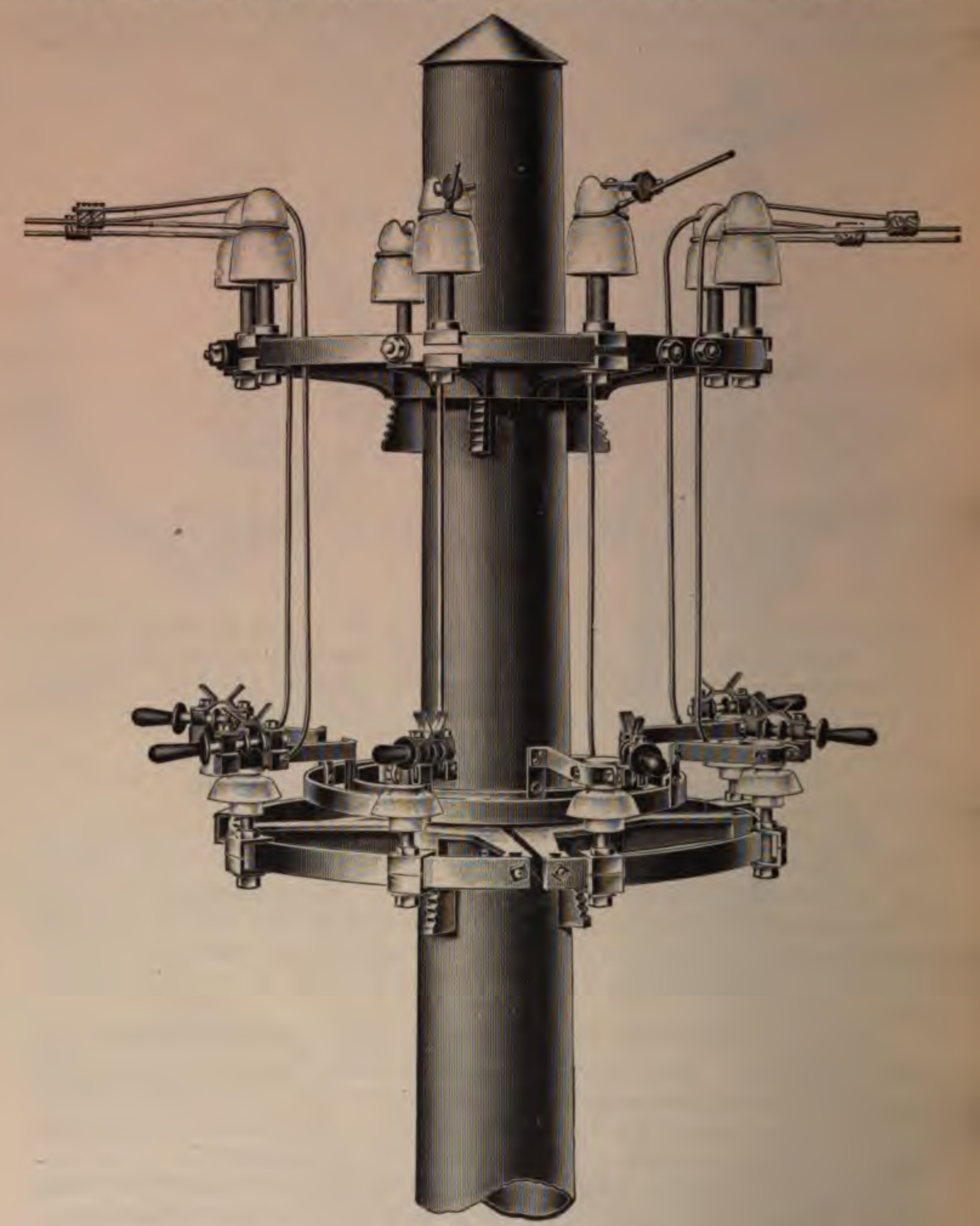


Fig. 223.

messer. Die Befestigung der Isolatoren erfolgt an den schmiedeeisernen Ringen mit Hilfe von verschiebbaren Klemmstücken, welche es gestatten, die Isolatoren so umzustellen, dass der Leitungszug senkrecht auf die Mitte des Mastes wirkt.

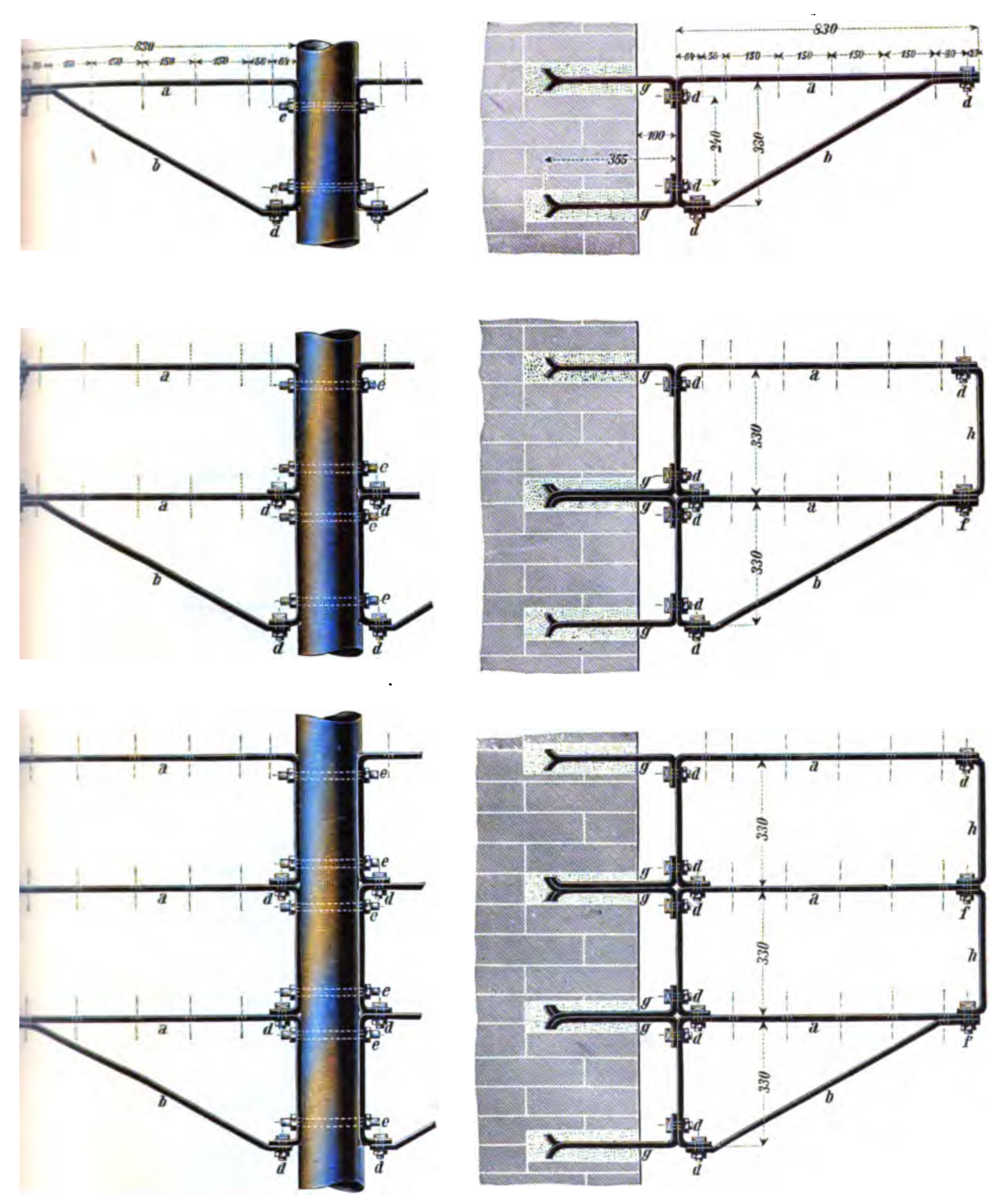


Fig. 224. Fig. 225.

Auch die Befestigung der die Sicherungen tragenden Isolatoren erfolgt in der gleichen Art am unteren Ring. Über dem Sicherungsring, aber innerhalb der für die Sicherungen bestimmten Isolatoren, sind Sammelringe angebracht, die durch Verbindungslaschen, die gleichzeitig als Träger dieser Ringe dienen, mit den Sicherungen verbunden sind. Für Drehstromnetze werden drei Sammelringe verwendet; für Netze, in denen nur zwei Ringe erforderlich sind, wird der innerste entfernt. Die Sammelringe sind, um sie ebenfalls an jeder Stelle um den Mast legen zu können, an einer Stelle aufgeschnitten. Alle Verbindungen sind durch Klemmvorrichtungen hergestellt, um Lötungen zu vermeiden.

Vorteilhaft lässt sich dieses System auch bei der Überführung von Kabeln zu Freileitungen verwenden, wenn eiserne Maste verwendet werden, in deren Innerem das Kabel bis zu dem am Kopf des Mastes angebrachten Kabelendverschlusse geführt wird, der dann mit den Sammelringen in leitende Verbindung gebracht wird.

146. Gestänge. Wertvoll ist das von dieser Firma besonders ausgebildete System von Isolatorenträgern, welches besonders für die Installation von Freileitungen

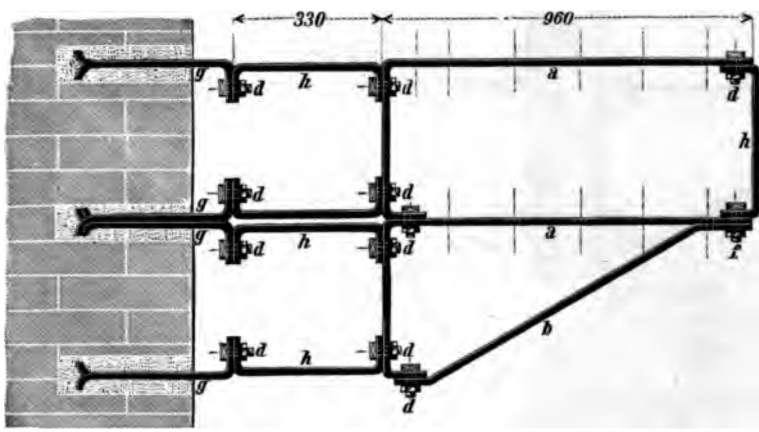
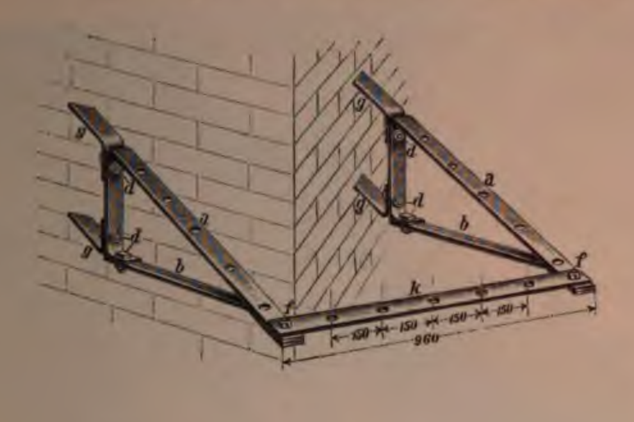


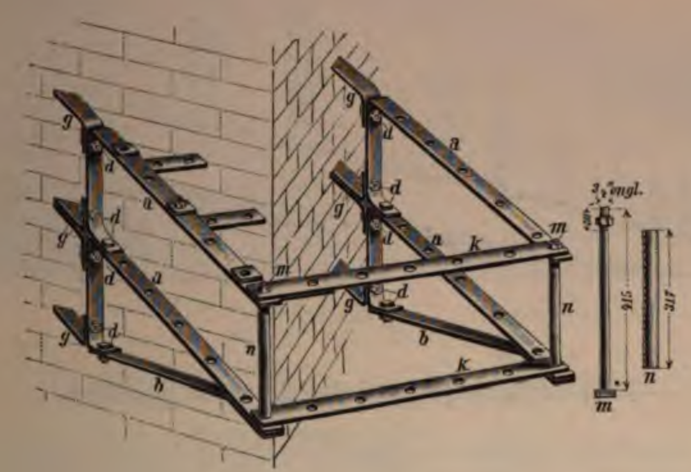
Fig. 226.

an Gebäuden gute Dienste leistet. Besonders bemerkenswert ist es, weil es aus einzelnen Elementen besteht, die in beliebiger Form zusammengesetzt werden können. Aus den Fig. 224—226 gehen die Einzelheiten ohne weiteres hervor. Die Gestänge, welche Fig. 224 zeigt, sind für Holzmaste bestimmt, die in Fig. 225 wiedergegebenen für die Befestigung an Häuserfronten. Bei diesen sind zwischen den eigentlichen Isolatorenträger und die Wand noch besondere Befestigungseisen geschoben, die bei der Anordnung für die Maste fehlen. Infolge dieser Anordnung ist es aber möglich, mit den Leitungen an den normalen Vorsprüngen der Häuser vorbei zu kommen. Treten diese jedoch aussergewöhnlich weit hervor, so können Verlängerungen durch Zwischenschaltung der in Fig. 224 u. 225 gezeigten normalen Stücke *h* hergestellt werden und es entsteht dann ein Gestänge nach Fig. 226.

Diese normalen Stücke können auch zu Verteilungspunkten zusammengestellt werden unter Hinzufügung weniger weiterer Bestandteile. So zeigt Fig. 227 an der Ecke eines Hauses angebrachte Anordnungen in schematischer Darstellung.

Fig. 228 zeigt die Konstruktion der Freileitung in der Anlage des Elektrizitätswerkes Maria-Theresienstadt unter Verwendung dieses Materials.





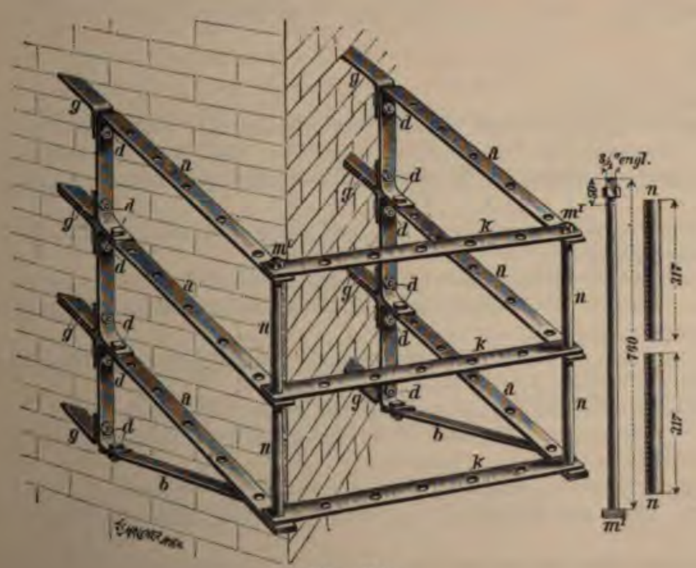


Fig. 227.



Fig. 228.

Telephonstörungen und Schutz gegen dieselben.[1])

Der telephonische Empfangsapparat ist infolge seiner ausserordentlichen Empfindlichkeit für elektrische Störungen ganz besonders empfänglich. Es ist authentisch festgestellt, dass die in einer 16 kerzigen Glühlampe verbrauchte Energie ausreicht, um in 30 Billionen Empfängern einen hörbaren Ton zu erzeugen.

---

1) Hierzu vergleiche:

MEYER, Über die geeignete und wirtschaftlich richtige Art und Weise, in welcher elektrische Leitungen für Telegraphie, Telephonie, elektrische Beleuchtung und Kraftübertragung nebeneinander ausgeführt und sicher gestellt werden können, ETZ 1901, S. 607.

BAUMANN, Das Verhältnis zwischen Stark- und Schwachstromanlagen in technischer und rechtlicher Beziehung, ETZ 1901, S. 675.

GRAWINKEL, Störende induktorische Einwirkungen von Drehstrom, ETZ 1892, S. 7, 297.

GRAWINKEL, Einfluss des Mittelleiters im Dreileitersystem auf Fernsprechleitungen, ETZ 1893, S. 62, 548.

LAHMEYER, Störende induktorische Einwirkungen von Drehstrom, ETZ 1892, S. 31; hierzu siehe ETZ 1892, S. 297, WILKENS.

STRECKER, Der Schutz der Fernsprechleitungen gegen Induktion, ETZ 1892, S. 128.

STEINMETZ, Verhältnis von Starkstrom zu Schwachstrom in den Vereinigten Staaten, ETZ 1892, S. 271.

WIETLISBACH, Einfluss der Starkstrom- auf Schwachstromleitungen, ETZ 1892, S. 285.

WIETLISBACH, Über die Störungen der Starkströme auf Telephonleitungen, ETZ 1896, S. 253.

ERHARD, Einfluss einer Dreileiteranlage auf Schwachstromanlagen, ETZ 1893, S. 655.

Siehe ferner: ETZ 1888, S. 110; 1892, S. 211; 1893, S. 591; 1896, S. 233, 263, 448; 1898, S. 71; 1899, S. 290, 597.

Die Telephonleitungen müssen daher vor den induktiven Wirkungen benachbarter Starkstromleitungen geschützt werden, und zwar wird dies besonders in solchen Fällen erforderlich sein, in denen Telephonleitungen mit der Hochspannungsleitung parallel laufen, da die dann hervorgerufenen störenden Wirkungen durch Induktion sehr gross werden können.

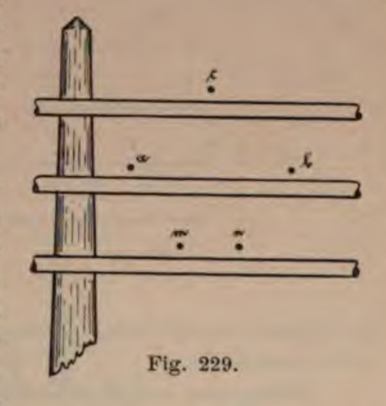
Störende Wirkungen können in Telephonstromkreisen durch hochgespannte Ströme auf drei verschiedene Arten hervorgerufen werden:

1. durch elektromagnetische Induktion,
2. durch elektrostatische Induktion,
3. durch direkten Übertritt von Strom aus der Starkstrom- in die Schwachstromanlage.

147. Einwirkungen durch elektromagnetische Induktion.

Die elektromagnetische Induktion kann kurz als Transformatorwirkung bezeichnet werden.

In Fig. 229 seien *m* und *n* die beiden Drähte eines parallel laufenden Telephonstromkreises und *a*, *b* und *c* die Leitungen einer Dreiphasenanlage. Es können dann *a* und *b* als die primäre und *m* und *n* als sekundäre Wicklung eines Transformators gelten. Die elektromotorische Kraft im Stromkreis *m*—*n* ist unter anderem von der Stromstärke und der Periodenzahl des Stromes in der induzierenden Leitung abhängig.


Fig. 229.

Wenn *m* und *n* in bekannter Weise gekreuzt werden, so werden die in dem einen Teil der Telephonleitung entstehenden elektromotorischen Kräfte durch entgegengesetzte, die im anderen Teile auftreten, aufgehoben. Es werden also zwischen *m* und *n* die elektromagnetischen Wirkungen nur durch Kreuzen der Telephondrähte ausgeglichen, und zwar unabhängig davon, ob die Kraftübertragungsleitungen gekreuzt sind oder nicht. Andererseits kann aber auch das gleiche Resultat durch Kreuzen der Starkstromleitungen hervorgerufen werden. Immerhin können die Störungen durch elektromagnetische Kräfte gegenüber denen durch elektrostatische Wirkungen zurückgesetzt werden.

148. Einwirkungen durch elektrostatische Induktion.

Die elektrostatischen Wirkungen, welche im Kraftübertragungsstromkreis *a*, *b*, *c* auftreten, werden auch auf *m* und *n* wirken.

Hat z. B. der Leiter *a* eine negative Ladung, so wird er eine bestimmte positive Ladung in *m* induzieren und eine entsprechend geringere in *n*, weil *n* von *a* weiter entfernt ist. Sobald die negative Ladung aus *a* verschwindet, fliesst ein Strom von *m* nach *n*, welcher dem Differenzbetrage dieser Ladung proportional ist. Die elektrostatische Influenz von *b*, welche entgegengesetztes Vorzeichen hat wie *a*, wird die Wirkung von *a* verstärken. Durch die Kreuzung der Telephondrähte erreicht man, dass die Kraft, welche elektrostatische Ströme zwischen *m* und *n* erzeugt, aufgehoben wird. Von Wichtigkeit ist, dass ein zur Aufhebung elektromagnetischer Induktion zwischen den Leitungen bestimmtes Kreuzungssystem ebenfalls auch die elektrostatische Induktion verhindert.

Vergleicht man die elektromagnetischen und elektrostatischen Störungen in einem Teil einer ungekreuzten Telephonleitung, so wird man beobachten,

dass die erstere als konstante Spannungswirkung, die letztere als konstante Stromwirkung auftritt. Daher sind praktisch bei telephonischen Empfängern mit verschiedenem Widerstande die Amperewindungen, bezogen auf die elektromagnetische Induktion, gleich, während sie bei der elektrostatischen Induktion mit der Zahl der Windungen anwachsen und dadurch auch der Widerstand des Empfängers. Die elektrostatische und elektromagnetische Wirkung wird bei Anordnung nach Fig. 229 ungefähr gleich, wenn *a, b, c* eine Leitung ist, die 50 Amp. bei 20000 Volt führt und wenn der Telephonstromkreis einschliesslich der Empfänger einen Gesamtwiderstand von 1000 Ohm hat.

Neuerdings hat das Brückentelephon fast ganz den Platz des Serieninstrumentes in jedem Telephonwerk eingenommen, und zwar ist das letztere besonders unzulässig für den Gebrauch in einem Stromkreise, in welchem die statische Induktion eine ziemlich grosse Ausdehnung annehmen kann. Den Grund hierfür zeigt Fig. 230. Die Fernsprechleitung *m* habe zwischen *A* und *B* eine induzierte positive Ladung und zwischen *B* und *C* eine negative.

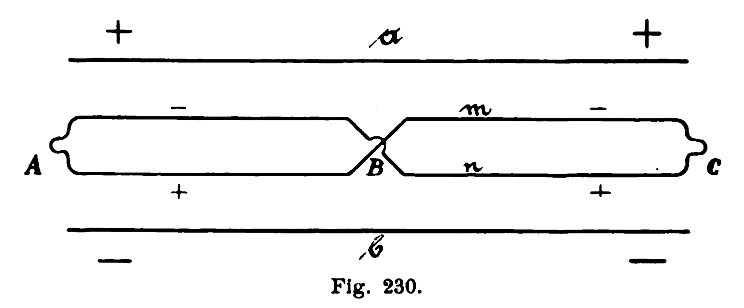


Fig. 230.

Es fliesst daher beim Kreuzungspunkt *B* ein Strom in *m* von einem Teil zum anderen.

Wenn nun bei *B* ein Serientelephon in Reihe mit *m* eingeschaltet wird, so wird es nicht allein durch den Ladungsstrom zwischen den beiden Teilen von *m*, sondern auch durch die bestehende Spannungsdifferenz beeinflusst und infolgedessen störende Ströme in Telephonen sowohl bei *A* als auch bei *C* erzeugt.

149. Kreuzungssysteme.

Die Art der Verdrillung der Starkstromleitungen kann auf die folgenden Arten ausgeführt werden. Sie erfolgt von Mast zu Mast, wie Fig. 231 a zeigt. Die Isolatoren werden abwechselnd gesetzt, wie die Skizze angiebt, um ein bequemes Kreuzen zu ermöglichen. Immer auf dem ersten und siebenten Mast haben die Leitungen die gleiche Lage, so dass eine vollständige Verdrillung nach sechs Wechseln vollendet ist. Bei weiten Fernstrecken ist es nicht erforderlich, die ganze Strecke zu verdrillen, es genügt eine mehrfache Verdrillung. Statt der in Fig. 231 a gezeigten Art der Verdrillung kann unter Zuhilfenahme einer grösseren Anzahl von Isolatoren der Leitungswechsel am Mast selbst vorgenommen werden, wie Fig. 231 b und c[1]) zeigen.

Wenn auch durch ein geeignetes Kreuzungssystem[2]) die Bildung einer induzierten elektromotorischen Kraft zwischen den beiden Telephondrähten verhütet wird, kann dadurch doch nicht gänzlich verhindert werden, dass die beiden Drähte eine Spannung annehmen, die gegen das Erdpotential ab-

1) Miller, Die Versorgung der Städte mit Elektrizität.
2) Vgl. ETZ 1888, S. 110.

weicht. In einem richtig gekreuzten System hat jeder Telephondraht dieselbe mittlere Entfernung von jeder Kraftübertragungsleitung und es ist daher die Spannung, welche das Telephonsystem durch die statische Induktion anzunehmen versucht, die des neutralen Punktes des Kraftsystems. Unter neutralem Punkt ist die Stelle zu verstehen, an welcher gegenüber der Kraftübertragungsleitung die gleiche mittlere elektromotorische Kraft herrscht. Wenn der neutrale Punkt der Kraftübertragungsleitung in der Spannung gegen Erde differiert, wird eine elektrostatische Spannungsdifferenz versuchen, zwischen Erde und den Telephondrähten aufzutreten, und es wird dieser Fall eintreten, wenn die Isolation des Telephonstromkreises vollkommen ist.

Die Höhe dieser elektrostatischen Spannung zwischen dem Telephonstromkreise und der Erde hängt von der relativen Kapazität zwischen Kraft- und Telephonleitung einerseits und zwischen Telephonleitung und Erde andererseits ab.

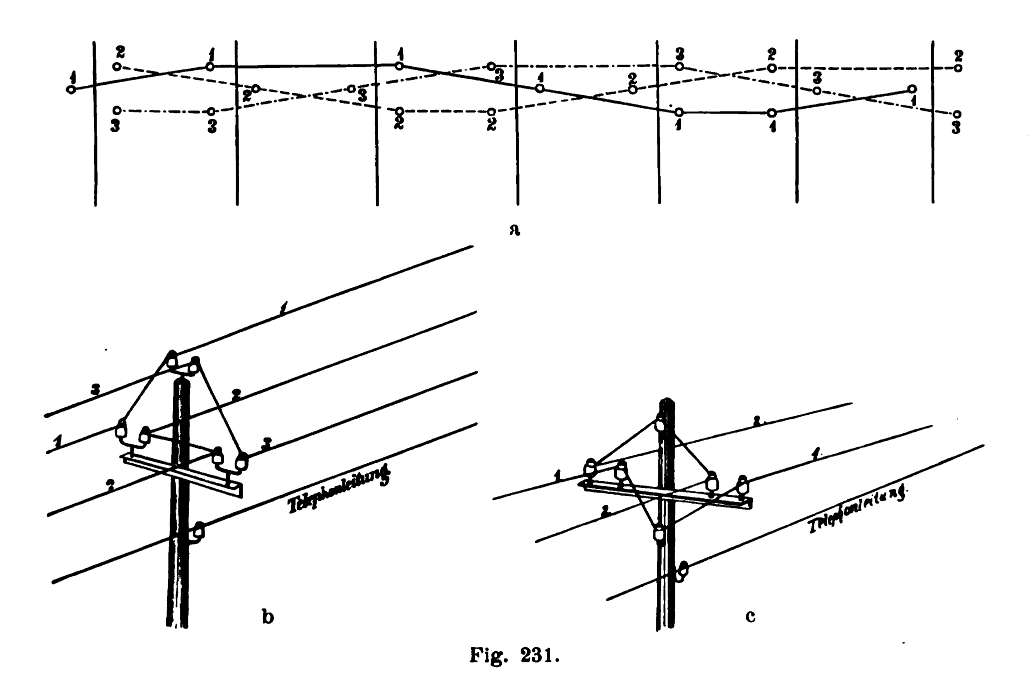


Fig. 231.

Erstere können als entgegengesetzte Platten eines Kondensators, letztere als solche eines zweiten Kondensators bezeichnet werden. Sind diese beiden Kondensatoren in Serien geschaltet, so verteilen sich die gesamten elektromotorischen Kräfte im umgekehrten Verhältnis zu ihrer Kapazität. Die Spannung der Telephondrähte gegen Erde kommt dann wenigstens der Hälfte der Spannung des neutralen Punktes der Kraftleitung gegen Erde gleich. Es kann daher eine geerdete Kraftleitung zwischen den Telephondrähten und der Erde eine Spannung hervorrufen, welche gut Tausende von Volt erreichen kann und ebenso kann ein schlechter Isolator eine elektromotorische Kraft zur Folge haben, die Hunderte von Volt aufweist. Im Zusammenhange hiermit werden in den meisten Fällen die Telephone unwirksam, wenn ein Erdschluss in der Kraftleitung auftritt, denn es werden Telephonleitungen gebaut, die eine Spannung von nur 5000 oder 10000, ja sogar nur 1000 Volt gegen Erde aushalten. Die höchste Spannung tritt nicht zwischen den

Telephondrähten auf, sondern zwischen beiden Drähten und der Erde. Wird nun an irgend einer Stelle die Isolation ganz oder teilweise durchschlagen, so entladet sich der Draht, welcher durchschlagen ist, gegen Erde, und der andere Draht muss sich durch das Telephon gegen Erde entladen.

Eine sorgfältige Rücksichtnahme bei Anlage und Betrieb von Telephonlinien, wenn sich diese in der Nähe einer Hochspannungsleitung befinden, ist daher auf folgende Punkte zu verwenden.

150. An die Telephonanlage zu stellende Forderungen.

Es muss eine vollkommene Isolation der gesamten Telephonanlage erreicht werden. Wenn eine Spannung zwischen Telephonleitung und Erde auftreten kann, die 30 % der Spannung zwischen den Kraftübertragungsleitungen beträgt, so ist daraus zu erkennen, dass der Isolationswert noch kein genügender ist. Die Telephondrähte dürfen daher nicht an feuchtem Holzwerk, die Apparate nicht an einer feuchten Wand befestigt werden. Wenn eine Leitung einer Prüfung von 15 bis 20 000 Volt widersteht, sind nicht Blitzableiter anzubringen, welche schon bei 300 Volt wirken, wie dies bei Blitzableitern für Schwachstromanlagen zutreffen kann.

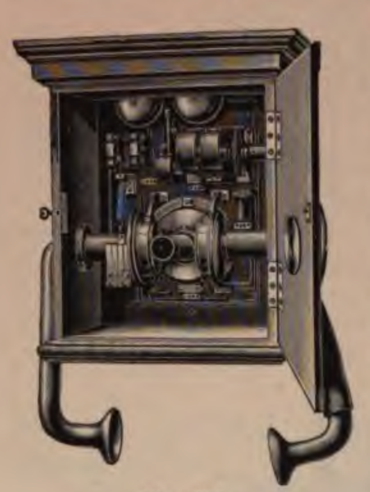


Fig. 232.

Wenn die Telephonleitung ununterbrochen in Betrieb ist, wird von höchster Wichtigkeit sein, darauf zu achten, dass eine genügende Isolation des das Telephon Gebrauchenden hergestellt wird, und zwar nicht nur, um denselben gegen die induzierte Spannung, sondern auch gegen solche Fälle zu schützen, in denen eine Berührung der Telephondrähte mit einer Kraftübertragungsleitung eintritt. Die Telephonisolation ist nur dann grossen Spannungen unterworfen, wenn die Kraftleitung geerdet oder statisch sehr unausgeglichen ist.

Die Telephonstation selbst kann konstruktiv derart ausgebildet sein, dass Schädigungen des Telephonierenden sehr unwahrscheinlich werden. So stellen Siemens & Halske A.-G. eine solche Station mit Schutzvorrichtung gegen Hochspannung her, die in Fig. 232 gezeigt ist.[1]) Sämtliche metallischen Teile sind im Inneren eines hölzernen Telephonspindes untergebracht, dessen innere Abmessungen eine genügend grosse Luftisolation der Metallteile von der sprechenden Person gestatten. Die notwendigerweise nach aussen führenden Teile, wie Kurbel und Hörrohre, sind aus isolierendem Material hergestellt. Die beiden Hörrohre sind drehbar angeordnet; das linke schaltet bei seiner Aufwärtsbewegung durch einen Umschalter die Sprechstellung ein.

151. Sicherheit gegen den Übertritt von Hochspannung in Schwachstromkreise.

Zur Sicherung gegen den Übertritt stärkerer Ströme aus den Starkstrom- in die Schwachstromleitungen schreibt die Reichs-Telegraphen-Verwaltung Schmelzsicherungen für die letzteren vor,[2]) was aber auch nur auf Anordnung dieser Behörde zu geschehen hat.

1) Vgl. ferner ETZ 1898, S. 430, 555.

2) Eine Erdungsvorrichtung, die sich aber nicht bewährte, wird beschrieben ETZ 1896, Heft 13; sie wurde verbessert von Cauter, vgl. ETZ 1899, S. 379. Siehe auch Steidle, Konstruktion elektrischer Sicherungen für Schwachstromanlagen. ETZ 1903, Heft 27 und 1904, Heft 44.

Notwendige Kreuzungen der Telephone mit Starkstromleitungen haben unter Beobachtung besonderer Vorschriften zu geschehen, um Störungen durch elektromagnetische und elektrostatische Wirkungen zu vermeiden.

An den oberirdischen Kreuzungsstellen der Starkstromleitungen mit den Fernsprechleitungen müssen die ersteren auf eine ausreichende Länge (mindestens in dem in Betracht kommenden Stützpunktzwischenraum) aus isoliertem Draht hergestellt werden, oder es müssen bei Verwendung von blankem Draht Schutzvorrichtungen (geerdete Schutznetze u. s. w.) angebracht werden, welche eine Berührung der beiden Leitungen ausschliessen. Die isolierten Starkstromleitungen sind auch nur dann zu verwenden, wenn die normale Betriebsspannung 1000 Volt nicht übersteigt. Der Abstand der beiden Leitungssysteme voneinander muss in vertikaler Richtung mindestens 1·25 m betragen. Die Kreuzungen sollen thunlichst im rechten Winkel erfolgen.

An Stellen, an welchen die Starkstrom- mit den staatlichen Schwachstromleitungen parallel laufen, tritt in den letzteren häufig ein so starkes Geräusch auf, dass eine Verständigung durch das Telephon fast ausgeschlossen ist. Für diesen Fall soll daher der Abstand dieser beiden Leitungssysteme voneinander mindestens 10 m betragen und es muss, sobald Schutzmassregeln durch Anwendung isolierten Drahtes u. s. w. nicht getroffen sind, dafür gesorgt werden, dass eine Berührung der Telephonleitungen durch Umbruch von Stangen oder Herabfallen von Drähten unbedingt ausgeschlossen ist.

Es sind für Telephonanlagen aus den anfangs geschilderten Gründen nur Brückentelephone an Stelle der Serienapparate zu verwenden. Auf die näheren Einzelheiten braucht nunmehr nicht näher eingegangen zu werden, jedoch ist die Kapazität der Telephondrähte gegen Erde möglichst gross, die der Telephondrähte gegen die Kraftübertragungsanlage so klein wie möglich einzurichten.

Bei Berücksichtigung, dass bei der in Fig. 217 gezeigten gebräuchlichen Anordnung eine ganz erhebliche Spannungserhöhung in den Telephondrähten eintreten kann, die in Anlagen mit Spannungen von 50000 Volt und darüber etwa bis 20—25000 Volt gegen Erde betragen kann, muss man darauf bedacht sein, diese Spannung zu reduzieren. Um dies aber zu ermöglichen, muss entweder die Kapazität des Kraft-Telephondraht-Kondensators vermindert oder die des Telephondraht-Erd-Kondensators vermehrt werden, oder aber beides. Es kann dies erreicht werden durch Vergrössern des Abstandes zwischen Kraft- und Telephonleitung einerseits und Verkleinern des Abstandes zwischen Telephondrähten und Erde andererseits. Die Grenze, bis zu der dies geschehen kann, ist bei gleicher Stützenbauart durch die zulässige Spannung zwischen den Telephondrähten und der Erde immer gegeben. Die Kapazität des Telephondraht-Erd-Kondensators kann weiter noch vermehrt werden durch Einwirkung der Erde auf die Telephondrähte, anstatt der Telephondrähte auf die Erde. Es ist dies der Fall, wenn eine oder mehrere Erdleitungen in nächster Nähe der Telephondrähte laufen, wodurch die Kapazität des Telephonleitungs-Erd-Kondensators fast zu jeder beliebigen Grösse anwachsen kann. Die zwischen den Telephondrähten und der Erde auftretende Spannung kann hierdurch in Grenzen gehalten werden, welche für die Sicherheit des Betriebes und der Person erforderlich sind.

152. Ministerielle Verfügungen.

Zum Schutz der Schwachstromleitungen gegen Starkstrom haben die Minister des Innern und der öffentlichen Arbeiten am 13. Februar 1901 die folgenden Grundsätze veröffentlicht.

1. Für die mit elektrischen Starkströmen zu betreibenden Anlagen müssen die Hin- und Rückleitungen durch besondere Leitungen gebildet werden. Die Erde darf als Rückleitung nicht benutzt oder mitbenutzt werden. Auch dürfen in Dreileiteranlagen die blank in die Erde verlegten oder mit der Erde verbundenen Mittelleiter Verbindungen mit den Gas- oder Wasserleitungsnetzen nicht erhalten, wenn die vorhandenen Reichstelegraphen- oder Fernsprechleitungen mit diesen Netzen verbunden sind.

2. Die Hin- und Rückleitungen müssen in so geringem, überall gleichem Abstande voneinander verlaufen, als die Rücksicht auf die Sicherheit des Betriebes zulässt.

3. An den oberirdischen Kreuzungsstellen der Starkstromleitungen mit den Reichstelegraphen- und Fernsprechleitungen müssen entweder die Starkstromleitungen auf eine ausreichende Länge — mindestens in dem in Betracht kommenden Stützpunktszwischenraum — aus isoliertem Drahte hergestellt werden oder es müssen bei Verwendung blanken Drahtes Schutzvorrichtungen (geerdete Schutznetze u. s. w.) angebracht werden, durch welche eine Berührung der beiderseitigen Drähte verhindert oder unschädlich gemacht wird. Die Verwendung isolierten Drahtes für die Starkstromleitungen ist jedoch nur dann als ausreichender Schutz zu betrachten, wenn die normale Betriebsspannung 1000 Volt nicht übersteigt. Der Abstand der Konstruktionsteile der Starkstromanlage von den Schwachstromleitungen darf in vertikaler Richtung nicht weniger als 1·25 m betragen.

Die Kreuzungen haben thunlichst im rechten Winkel zu erfolgen.

4. An denjenigen Stellen, an welchen die Starkstromleitungen neben den Schwachstromleitungen verlaufen und der Abstand der Stark- und Schwachstromdrähte voneinander weniger als 10 m beträgt, sind Vorkehrungen zu treffen, durch welche eine Berührung der Stark- und Schwachstromleitungen sicher verhütet wird. Beträgt die Betriebsspannung in der Starkstromanlage nicht mehr als 1000 Volt, so kann als Schutzmittel isolierter Draht verwendet werden. Von dieser Bedingung kann abgesehen werden, wenn die örtlichen Verhältnisse eine Berührung der Stark- und Schwachstromleitungen auch beim Umbruch von Stangen oder beim Herabfallen von Drähten ausschliessen.

5. Die isolierende Hülle des nach Punkt 3 und 4 zu benutzenden isolierten Drahtes darf nicht durchschlagen werden, wenn sie einer Spannung ausgesetzt wird, welche das Doppelte der Betriebsspannung beträgt.

6. Die unterirdischen Starkstromleitungen müssen thunlichst entfernt von den Reichstelegraphen- und Fernsprechkabeln, womöglich auf der anderen Strassenseite, verlegt werden.

Werden Reichstelegraphen- oder Fernsprechkabel von Starkstromkabeln gekreuzt oder verlaufen die Kabel in einem seitlichen Abstande von weniger als 50 cm nebeneinander, so müssen die Starkstromkabel auf der den Schwachstromkabeln zugewendeten Seite mit Cementhalbmuffen von wenigstens 6 cm Wandstärke versehen und innerhalb dieser in Wärme schlecht leitendes Material (Lehm u. dergl.) eingebettet werden. Die Muffen müssen 50 cm zu beiden Seiten der gekreuzten Schwachstromkabel bezw. bei seitlichen Annäherungen ebenso weit über den Anfangs- und Endpunkt der gefährdeten Strecke hinausragen.

Ausserdem müssen an denjenigen Stellen, an welchen die Starkstromkabel unterhalb der Schwachstromkabel, letztere kreuzend, oder in einem

seitlichen Abstande von weniger als 50 cm neben ihnen verlegt werden sollen, die Schwachstromkabel zur Sicherung gegen mechanische Angriffe mit zweiteiligen eisernen Rohren oder Muffen bekleidet werden, die über die Kreuzungs- und Näherungsstelle nach jeder Seite hin etwa 1 m hinausragen.

Von diesen Schutzvorkehrungen kann Abstand genommen werden, wenn die Starkstromkabel oder die Schwachstromkabel sich in gemauerten oder in Cement- u. s. w. Kanälen von mindestens 6 cm Wandstärke befinden.

7. Zum weiteren Schutze der Reichstelegraphen- und Fernsprechanlagen, insbesondere zur thunlichsten Verhütung von Brandschäden für den Fall des Übertritts stärkerer Ströme aus den Starkstromleitungen in die Schwachstromleitungen werden in letztere Schmelzsicherungen eingeschaltet. Die Einschaltung wird von der Reichstelegraphenverwaltung bewirkt werden.

8. Sind infolge des parallelen Verlaufs der beiderseitigen Anlagen oder aus anderen Ursachen Störungen der Telegraphen- oder Fernsprechleitungen durch Induktion oder Stromübergang zu befürchten oder treten solche Störungen auf, so sind im Benehmen mit der Reichstelegraphenverwaltung geeignete Massnahmen zur Beseitigung der störenden Einflüsse zu treffen.

9. Falls die vorgesehenen Schutzmassregeln nicht ausreichen, um Unzuträglichkeiten oder Störungen für den Telegraphen- oder Fernsprechbetrieb fernzuhalten, sind im Einvernehmen mit der zuständigen Oberpostdirektion weitere Massnahmen zu treffen, bis die Beseitigung der Unzuträglichkeiten oder der störenden Einflüsse erfolgt ist.

10. Falls Fehler in der Starkstromanlage zu Störungen des Telegraphen- oder Fernsprechbetriebes Anlass geben, muss der Betrieb der Starkstromanlage in solchem Umfange und so lange eingestellt werden, wie dies zur Beseitigung der Fehler erforderlich ist.

11. Spätere wesentliche Veränderungen oder Erweiterungen der Starkstromanlage sollen im Einvernehmen mit der Kaiserlichen Oberpostdirektion ausgeführt werden. Die Unternehmer verpflichten sich, der genannten Behörde von derartigen Plänen rechtzeitig vorher Kenntnis zu geben.

Die überaus häufige falsche Auslegung der vorstehenden Bestimmungen haben die Minister veranlasst, die folgenden Erläuterungen 1904 herauszugeben. Sie haben so allgemeines Interesse, dass sie hier dem Erlass folgen:

„Durch unseren Erlass vom 13. Februar 1901 haben wir eine Zusammenstellung derjenigen Schutzmassregeln mitgeteilt, welche die Telegraphenverwaltung zum Schutze ihrer Anlagen bei dem Bau und Betrieb elektrischer Starkstromanlagen — die nicht dem Betriebe von Eisenbahnen dienen — für erforderlich erachtet. Dieser Erlass ist dahin missverstanden worden, als ob er die Polizeibehörden habe verpflichten wollen, die Unternehmer von Starkstromanlagen, die mit Telegraphen- und Fernsprechanlagen konkurrieren, zur „Anerkennung" der in der „Zusammenstellung" enthaltenen Forderungen der Telegraphenverwaltung anzuhalten oder ihnen entsprechende polizeiliche Auflagen zu machen. Demgegenüber weisen wir darauf hin, dass nach dem Wortlaute des Erlasses die „Zusammenstellung" der Schutzmassregeln den Polizeibehörden nur „zur Kenntnis" hat mitgeteilt werden sollen, dass dieselbe ausgesprochenermassen nur als Anrecht für privatrechtliche „Vereinbarungen" zwischen dem Unternehmer der Starkstromanlage und der Telegraphenverwaltung gedacht ist, und dass die Herbeiführung privatrechtlicher Vereinbarungen und die

Sicherung privatrechtlicher Ansprüche **nicht** zu den Aufgaben der Polizeibehörden gehört. Das Interesse, welches die Polizeiverwaltung an dem Schutze von Telegraphen- und Fernsprechanlagen gegenüber elektrischen Starkstromanlagen haben kann, erledigt sich jedoch nicht durch das Vorhandensein oder das voraussichtliche Zustandekommen einer diesen Schutz bezweckenden privatrechtlichen „Vereinbarung“ zwischen dem Unternehmer der Starkstromanlage und der Telegraphenverwaltung. Denn soweit die Polizeibehörden für diesen Schutz zuständig sind, haben sie ihn von Amts wegen zu gewährleisten. Nach der Reichsgesetzgebung beschränkt sich der polizeiliche Schutz der Telegraphen- und Fernsprechanlagen gegenüber anderen elektrischen Anlagen aber auf den allgemeinen Schutz für Leben und Eigentum, also auf den Schutz für den Bestand (die Substanz) der Telegraphen- und Fernsprechanlagen und auf den Schutz für die Sicherheit (Leben und Gesundheit) des Bedienungspersonals, während der behördliche Schutz des Telegraphen- und Fernsprechbetriebes gegen „störende Beeinflussungen“ durch andere elektrische Anlagen den Gerichten vorbehalten ist. Wir beziehen uns dafür und bezüglich des Begriffes der „störenden Beeinflussungen“ auf unseren, die elektrischen Kleinbahnen betreffenden Erlass vom 9. Februar d. J.[1])

Wir bestimmen deshalb, dass die Polizeibehörden bei der Herstellung von Starkstromanlagen, durch deren Bau oder Betrieb der Bestand vorhandener Telegraphen- oder Fernsprechanlagen oder die Sicherheit des Bedienungspersonals gefährdet werden könnten, von Amts wegen von dem Unternehmer der Anlage die Vorlegung der zur polizeilichen Prüfung des Vorhabens erforderlichen Unterlagen (Plan, Erläuterungsbericht u. dergl.) zu verlangen, über diese die Telegraphenverwaltung zu hören und die zum Schutze der Telegraphen- und Fernsprechanlagen erforderlichen Vorkehrungen durch polizeiliche Verfügung förmlich festzusetzen haben. Dies gilt namentlich von Starkstromanlagen, die öffentliche Wege benutzen oder kreuzen sollen, die bereits von Telegraphen- oder Fernsprechanlagen benutzt oder gekreuzt werden. Die Erörterungen der Polizeibehörden mit der Telegraphenverwaltung und die dem Unternehmer der Starkstromanlage im Hinblick auf die Telegraphenanlagen zu machenden polizeilichen Auflagen haben sich grundsätzlich auf diejenigen Vorkehrungen zu beschränken, die den Bestand (die Substanz) der Telegraphen- oder Fernsprechanlagen, sowie Leben und Gesundheit des Bedienungspersonals zu schützen bestimmt sind. Welche Vorkehrungen hierfür im allgemeinen in Frage kommen, ergiebt sich aus unserem oben erwähnten Erlass vom 9. Februar d. J., insonderheit aus Ziffer 1, 4, 5, 6, 7 und 8 der „Allgemeinen Anforderungen“ daselbst.[2]) Ein polizei-

---

1) Siehe ETZ 1904, Heft 10, S. 192.

2) Der Erlass, betr. den Schutz der Telephon- und Fernsprechanlagen gegenüber elektrischen Kleinbahnen, ist zu finden ETZ 1904, S. 192. Die dort angezogenen Ziffern 1, 4, 5, 6, 7, 8, welche für Starkstromanlagen im allgemeinen in Betracht kommen, seien hier wiedergegeben:

1. Falls die Stromzuführung durch eine oberirdische blanke Leitung erfolgt, muss diese, die „Arbeitsleitung“, an allen Stellen, wo sie vorhandene oberirdische Telegraphen- oder Fernsprechlinien kreuzt, mit Schutzvorrichtungen versehen sein, durch welche eine Berührung der beiderseitigen Leitungen verhindert oder unschädlich gemacht wird. Solche Vorrichtungen können u. a. bestehen in geerdeten Schutzdrähten oder Fangnetzen, aufgesattelten Holzleisten u. dergl.

4. An oberirdischen Kreuzungen der beiderseitigen Anlagen muss der Abstand der untersten Telegraphen- oder Fernsprechleitung von den höchstgelegenen stromführenden

liches Interesse, dem Unternehmer der Starkstromanlage die Benutzung oder Mitbenutzung der Erde zur Rückleitung grundsätzlich zu verbieten, liegt nicht vor. Ein solches Verbot kann nur in Frage kommen, wenn und soweit von dieser Installationsform im Einzelfalle thatsächlich Gefahren für Leben und Gesundheit und Eigentum zu besorgen sein sollten (vgl. auch Ziffer 2 der Bemerkungen und Ziffer 3 der Anlage des Erlasses vom 9. Februar d. J.). Die dem Unternehmer zu machenden Auflagen haben sich nicht auf ihren Betrieb (Erhaltung der Schutzvorkehrungen, spätere Veränderungen und Erweiterungen der Anlage, Aufgrabungen u. dergl.) zu erstrecken.

Wenngleich die Telegraphenverwaltung über die dem Unternehmer der Starkstromanlage zu machenden polizeilichen Auflagen zu hören ist, steht ihr ein Mitbestimmungsrecht bezüglich dieser Auflagen nicht zu, da über den Inhalt polizeilicher Verfügungen massgebend nur die Polizeibehörde befinden kann. Im Hinblick auf die Bedeutung der Telegraphen- und Fernsprechanlagen und die besondere Sachkenntnis und Erfahrung der Telegraphenverwaltung ist ihr jedoch Gelegenheit zur Rückäusserung zu geben, falls oder soweit die Polizeibehörde den Anträgen der Telegraphenverwaltung nicht glaubt stattgeben zu können. Ingleichen sind die Forderungen der

---

Teilen der Bahnanlage mindestens 1 m betragen. Die Masten zur Aufhängung der oberirdischen Leitungen müssen von vorhandenen Telegraphen- oder Fernsprechleitungen mindestens 1·25 m entfernt bleiben.

5. Wo die Arbeits- oder Speiseleitungen der Bahn streckenweise in einem Abstand von weniger als 10 m neben den Telegraphen- oder Fernsprechleitungen verlaufen und die örtlichen Verhältnisse eine Berührung der beiderseitigen Leitungen auch beim Umstürzen der Träger oder beim Herabfallen der Drähte nicht ausschliessen, müssen die Gestänge der Bahnanlage, nötigenfalls auch die der Telegraphenanlage, durch kürzere als die sonst üblichen Abstände, durch entsprechend stärkere Stangen und Masten und durch sonstige Verstärkungsmittel (Streben, Anker u. dergl.) gegen Umsturz besonders gesichert sein; auch müssen die Drähte an den Isolatoren so befestigt sein, dass eine Lösung aus ihren Drahtlagern ausgeschlossen ist.

6. Unterirdische Speiseleitungen müssen unterirdischen Telegraphen- oder Fernsprechkabeln thunlichst fernbleiben. Bei Kreuzungen und bei seitlichen Abständen der Kabel von weniger als 0·50 m müssen die Bahnkabel auf der den Telegraphenkabeln zugekehrten Seite mit Cementhalbmuffen von wenigstens 0·06 m Wandstärke versehen und innerhalb dieser in Wärme schlecht leitendes Material (Lehm oder dergl.) eingebettet sein. Diesen Muffen müssen 0·50 m zu beiden Seiten der gekreuzten Telegraphenkabel, bei seitlichen Annäherungen ebensoweit über den Anfangs- und Endpunkt der gefährdeten Strecke hinausragen. Liegt bei Kreuzungen und bei seitlichen Abständen der Kabel von weniger als 0·50 m das Bahnkabel tiefer als das Telegraphenkabel, so muss letzteres zur Sicherung gegen mechanische Angriffe mit zweiteiligen eisernen Rohren bekleidet sein, die über die Kreuzungs- und Näherungsstelle nach jeder Seite hin 1 m hinausragen. Solcher Schutzvorrichtungen bedarf es nicht, wenn die Bahn- oder die Telegraphenkabel sich in gemauerten oder in Cement- oder dergl. Kanälen von wenigstens 0·06 m Wandstärke befinden.

7. Von beabsichtigten Aufgrabungen in Strassen mit unterirdischen Telegraphen- oder Fernsprechkabeln ist der zuständigen Oberpostdirektion oder den zuständigen Post- oder Telegraphenämtern bei Zeiten vor dem Beginn der Arbeiten schriftlich Nachricht zu geben. Falls durch solche Arbeiten der Telegraphen- oder Fernsprechbetrieb gestört werden könnte, sind die Arbeiten auf Antrag der Telegraphenverwaltung zu Zeiten auszuführen, in denen der Telegraphen- bezw. Fernsprechbetrieb ruht.

8. Fehler — d. h. ein schadhafter Zustand — in der Starkstromanlage der Bahn, durch welche der Bestand der Telegraphen- und Fernsprechanlagen oder die Sicherheit des Bedienungspersonals gefährdet werden könnte, sind ohne Verzug zu beseitigen; ausserdem ist der elektrische Betrieb der Bahn im Wirkungsbereich der Fehler bis zu deren Beseitigung einzustellen.

Telegraphenverwaltung vor der endgültigen Beschlussfassung der Polizeibehörde stets dem Unternehmer der Starkstromanlage zur Erklärung mitzuteilen. Zur Beschleunigung des Verfahrens empfiehlt sich, diese Erörterungen eventuell in kontradiktorischer Verhandlung mit den beiden Teilen zu erledigen. Die dem Unternehmer zu machenden Auflagen sind stets ohne jede Beziehung zu etwaigen zwischen ihm und der Telegraphenverwaltung getroffenen oder zu treffenden privatrechtlichen „Vereinbarungen" festzusetzen, vollständig in die polizeiliche Verfügung aufzunehmen und als solche zu kennzeichnen, die der Unternehmer der Polizeibehörde gegenüber zu erfüllen hat. Demgemäss sind alle Auflagen zu unterlassen, die den Unternehmer beim Bau und Betriebe der Anlage in irgend einer Form von der Telegraphenverwaltung, insonderheit auch von deren Einvernehmen oder Zustimmung abhängig machen könnten. Das schliesst nicht aus, ihm in einzelnen Beziehungen, beispielsweise bezüglich geplanter Aufgrabungen oder Veränderungen oder Erweiterungen der Anlage u. dgl. eine vorgängige Anzeige an die Telegraphenverwaltung zur Pflicht zu machen. Die Bestimmungen unter Ziffer 9 und 10 der Anlage des Erlasses vom 9. Februar d. J. sind nach Bedarf entsprechend zu verwerten. Von der polizeilichen Verfügung an den Unternehmer der Starkstromanlage, durch welche ihm besondere Auflagen zum Schutze der Telegraphenanlagen gemacht oder von der Telegraphenverwaltung verlangte Auflagen abgelehnt werden, ist stets eine Abschrift der Telegraphenverwaltung mitzuteilen.

Es ist selbstverständlich, dass bei der polizeilichen Prüfung geplanter Starkstromanlagen nicht bloss der Schutz der Telegraphen- und Fernsprechleitungen, sondern aller elektrischen Leitungen und aller Interessen wahrzunehmen ist, die durch die Anlage gefährdet werden könnten. Durch diesen Erlass finden unsere Erlasse vom 16. März 1886 und vom 21. Juni 1898 ihre Erledigung."

Verlegung der Leitungen in Innenräumen.

Allgemeines.

153. An eine Installation zu stellende Anforderungen.

An anderer Stelle[1]) ist die Konstruktion der für die Installation in Innenräumen in Frage kommenden Leitungen bereits besprochen worden. Dem Installateur steht ein mannigfaltiges Material zur Verfügung, unter dem er je nach der Beschaffenheit der Örtlichkeit seine Auswahl treffen kann, und er wird hierbei sehr sorgfältig zu wählen haben, je nachdem der betr. Raum trocken, feucht, triefend nass, feuergefährlich u. s. w. ist. Ferner sind die Zwecke zu berücksichtigen, denen ein Raum dient; es werden verschiedene Leitungen zu wählen sein, je nachdem es sich um Wohnräume, Fabriken, Bergwerke, Schiffe u. dgl. handelt.

Nicht aber allein die Wahl des Leitungsmaterials, sondern auch die Art der Verlegung wird, diesen verschiedenen Umständen Rechnung tragend, verschieden sein müssen.

Der Einfluss der Spannung ist ebenso wichtig und erfordert ausser einem gut isolierenden Leitungsmaterial auch eine besonders sichere Verlegung, da von dieser die persönliche Sicherheit zu gewährleisten ist.[2])

Es giebt nun sehr verschiedene Verlegungsmöglichkeiten, die näher zu besprechen der Zweck dieses Kapitels sein soll.

Die Anforderungen, die an eine Leitungsanlage zu stellen sind, sind die folgenden:

1. Ein genügend hoher Isolationswert,[3]) der stets zu erhalten ist; es muss demnach möglich sein, die Leitungen dauernd zu kontrollieren und leicht auszuwechseln.
2. Feuersicherheit durch Wahl genügend grosser Querschnitte, entsprechende Anordnung der Leitungen u. s. w.
3. Persönliche Sicherheit durch ausreichenden Schutz gegen Berührung,[2]) Erdung u. s. w.
4. Schönheitsrücksichten.
5. Möglichst geringe Kosten.

Nicht alle Punkte lassen sich in jeder Anlage berücksichtigen, oft müssen die für den Einzelfall weniger in Frage kommenden den wichtigeren gegenüber vernachlässigt werden.

---

1) Hdb. VI, 1, S. 156 f.

2) Näheres siehe Hdb. VI, 2: Persönliche Sicherheit.

3) Näheres siehe in diesem Hdb. VI, 2.

Die verlangte Zugänglichkeit[1]) der Leitungen verbietet ihre unmittelbare Verlegung in den Fussboden oder die Mauern. Sollen sie dem Auge entzogen sein, so müssen sie in Rohren oder Kanälen untergebracht werden, jedoch so, dass sie jederzeit wieder herausgezogen werden können. Für unterirdisch verlegte Kabel ist diese Verlegungsart nicht Bedingung, es muss nur dafür gesorgt werden, dass man zum Zwecke der Prüfung an ihre Endverschlüsse heran kann.

Sind in irgend einer Weise mechanische Verletzungen der Leitungen zu erwarten oder liegen sie im Handbereich, so müssen sie durch geeignete Verkleidungen geschützt werden. „Wo die Gefahr einer Verletzung vorliegt," sagt WEBER,[2]) „kann nicht allgemein angegeben werden; es richtet sich dies nach der Beschaffenheit und Benutzungsart der Örtlichkeit. Diese Gefahr ist z. B. stets vorhanden, soweit die Leitungen in Betriebsstätten, an denen grössere Werkstücke und Werkzeuge gehandhabt werden, in Küchen, Kinderzimmern u. dgl. im Handbereiche liegen. Besonders gefährdet sind die Fussbodendurchgänge, ferner auch Leitungen, welche unmittelbar auf den Fussböden, z. B. auf dem eines Speichers geführt sind, wie dies z. B. bei den Zuleitungen und sogenannten Oberlichtern bei Bühnenbeleuchtungen oder zu Kronleuchtern vorkommt. Diese bedürfen eines Schutzes auch dann, wenn der Speicher in der Regel nicht betreten wird. Überhaupt ist das Verlegen auf der Oberkante oder Oberfläche von horizontal verlaufenden Konstruktionsteilen der Gebäude viel weniger zu empfehlen, als die Benutzung der unteren oder seitlichen Flächen zu diesem Zweck."

Werden die Leitungen in Rohre verlegt, so sind sie durch diese geschützt; in der Regel werden solche Leitungen keines besonderen weiteren Schutzes bedürfen. An besonders gefährdeten Stellen, selbst wenn die Rohre in das Mauerwerk gebettet sind, wird man aber weitere schützende Massnahmen treffen müssen.

Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass alle üblichen Schutzvorrichtungen keinen absoluten mechanischen Schutz gewähren können; sie sollen unbeabsichtigte Beschädigungen ausschliessen, gegen rohe Gewalt können sie nicht schützen. Man soll daher nicht unbillige Schutzvorrichtungen verlangen, welche die Anlage zwecklos verteuern.

154. Kreuzungen.

Wie bei allen Leitungsverlegungen sind auch hier Kreuzungen möglichst zu vermeiden. Wo sie aber nicht zu umgehen sind, ist durch Zwischenlegung von Isoliermaterial ein Schutz gegen die Berührung von Leitern verschiedenen Potentials und verschiedener Stromkreise zu schaffen. In der Regel wird dieser durch übergeschobene Hartgummirohre herbeigeführt, die gegen Verschieben dadurch gesichert werden, dass sie mit Isolierband am Leiter festgebunden werden, oder dadurch, dass unmittelbar vor und hinter das schützende Hartgummirohr eine Rolle gesetzt wird. Wesentlich besser und sicherer ist es jedoch, Kreuzungen dadurch vorzunehmen, dass man die Leitungen in einem sicheren Abstand frei aneinander vorbeiführt, und können, um diese Entfernung zwischen beiden Leitern festzulegen, die in Fig. 233 und 263 gezeichneten Rollen verwendet werden. Die eine Leitung wird an der unteren Nute festgebunden, während die zweite kreuzende an die obere Nute gelegt wird.

---

1) Nach § 26 a der Sicherheitsvorschriften.

2) Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften 6. Aufl., S. 108.

Eine weitere Art, Niederspannungsleitungen zu kreuzen, zeigt Fig. 234 a, wobei über die eine Leitung ein Isolierkörper geschoben wird, während sich der andere Leiter in äussere Nuten desselben einlegt. In Fig. 234 b ist eine geteilte Rolle verwendet, an welcher die eine Leitung aussen mit Bindedraht festgebunden wird. Hierdurch werden gleichzeitig die beiden Rollenhälften zusammengehalten. Die zweite Leitung geht durch die Öffnung der Rolle.

Kreuzen sich Leitungen, welche mit Spannungen von über 250 Volt arbeiten, so ist möglichst von der Verwendung desselben Isolierkörpers für beide Leitungen Abstand zu nehmen und eine solche Entfernung zwischen

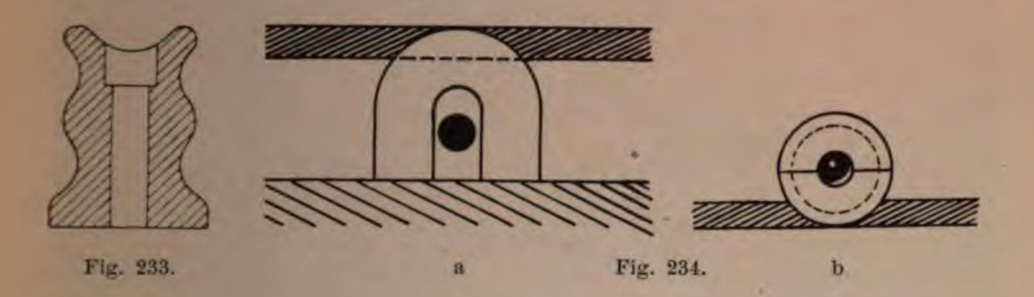


Fig. 233. a Fig. 234. b

beiden Leitungen zu wählen, dass ein Überschlagen der in Frage kommenden Spannung nicht möglich ist.

155. Werkzeuge.

Wichtig für die Herstellung einer guten Installation ist gutes und geeignetes Werkzeug, welches in richtiger Zusammenstellung dem Werkplatz zugeführt werden muss. Im Nachfolgenden seien zwei dieser Zusammenstellungen wiedergegeben, wie sie von SIEMENS & HALSKE ausgearbeitet worden sind, und zwar ist die erste für kleine und kurze Montagen, die letztere für grosse bestimmt; zwischen beiden liegt noch eine mittlere Zusammenstellung (Gewicht 76 kg) und ausserdem wird noch ein sehr grosser Werkzeugkasten (Gewicht 240 kg) geliefert, der die gleichen Werkzeuge nur in reicherer Zusammenstellung enthält, wie derjenige, dessen Inhalt wiedergegeben ist.

Werkzeugkasten Grösse I.

Gewicht etwa 19 kg. Masse 500 × 240 × 180 mm.

Inhalt:

1 Flaschenzug, bestehend aus 2 eisernen Kloben mit je 3 nebeneinander liegenden Messingrollen von 40 mm Durchmesser, 2 Froschklemmen für Leitungen bis 35 mm² Querschnitt und 1 Hanfleine von 25 m Länge und 5 mm Durchmesser.
1 Handhammer 0·5 kg schwer, mit Stiel.
1 Niethammer 0·15 kg schwer, mit Stiel.
1 Steinmeissel 300 mm lang.
3 Schraubenzieher 12, 8 und 4 mm breit, mit Heften.
1 Kolumbus-Schraubenschlüssel 210 mm lang.
1 Fuchsschwanzsäge von 360 mm Blattlänge.
1 flache Vorfeile 250 mm lang, mit Heft.
1 flache Schlichtfeile 250 mm lang, mit Heft.
1 flache Holzraspel 250 mm lang, mit Heft.
1 Durchschlag.
1 Körner.
3 Flachzangen mit Seitenschneiden 210, 160 und 105 mm lang.
3 Rundzangen 210, 160 und 105 mm lang.
1 Brennerzange 235 mm lang.
1 Kneifzange 210 mm lang.
1 Feilkloben 105 mm lang.

1 Ligroinlötlampe mit Zubehör.
1 Lötkolben 0·5 kg schwer, mit Stiel und Heft.
3 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 10, 13 und 17 mm Durchmesser, 250 mm lang.
1 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 20 mm Durchmesser, 300 mm lang.
1 Kabelmesser.
3 Nagelbohrer von 2, 4 und 6 mm Durchmesser.
1 Schutzbrille in Futteral.
1 Germania-Tourenzähler mit Glocke, in Etui.
1 Wasserwage in gusseisernem Gehäuse mit Messingdecke, 250 mm lang, in Schutzkasten, für horizontale und vertikale Messungen.

Werkzeugkasten Grösse III (Fig. 235).

Gewicht etwa 121 kg. Masse 640 × 425 × 400 mm.

Inhalt:

1 Flaschenzug, bestehend aus 2 eisernen Kloben mit je 3 nebeneinander liegenden Messingrollen von 50 mm Durchmesser, 2 Froschklemmen für Leitungen bis 35 mm^2 Querschnitt und 1 Hanfleine von 25 mm Länge und 8 mm Durchmesser.
2 Kettenfroschklemmen für Leitungen bis 120 mm^2 Querschnitt.
1 Schlägel 1·5 kg schwer, mit Stiel.
1 Bankhammer 1 kg schwer, mit Stiel.
1 Handhammer 0·5 kg schwer, mit Stiel.
1 Niethammer 0·15 kg schwer, mit Stiel.
1 Patentholzhammer mit Stiel.
2 Reserve-Einsätze für den Patentholzhammer.
4 Lötkolben 1·5 kg, 1 kg, 0·5 kg und 0·25 kg schwer, mit Stiel und Heft.
3 Steinmeissel 300 mm, 400 mm und 500 mm lang.
1 Hartmeissel 250 mm lang.
1 Kreuzmeissel 200 mm lang.
2 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 26 mm Durchmesser, 400 mm und 500 mm lang.
2 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 20 mm Durchmesser, 300 mm und 500 mm lang.
3 Kronen- oder Rohrbohrer aus Stahlrohr von 10, 13 und 17 mm Durchmesser, 250 mm lang.
1 eiserne Brustleier von 130 mm Schwungweite.
8 Centrumbohrer von 7, 10, 13, 16, 20, 26, 30 und 34 mm Durchmesser.
8 amerikanische Schlangenbohrer von 7, 10, 13, 16, 20, 23, 26 und 30 mm Durchmesser.
14 amerikanische Spiralbohrer (Morsebohrer) für Metall je 2 Stück Type sch. 1, 14, 16, 21, 29; je 1 Stück Type sch. B, P, T, Y.
5 Nagelbohrer von 2 bis 6 mm Durchmesser.
6 Lattenbohrer von 7, 10, 13, 16, 20 und 26 mm Durchmesser.
6 Stubs-Reibahlen Type sch. 46, 20, B, P, X, und 8″, mit Heften.
1 Krauskopf von 16 mm Durchmesser, für Metall.
8 Schraubenzieher, je 2 von 4, 8, 10 und 16 mm Breite, mit Heften.
3 Schraubenzieher für Brustleier, von 6 u. 8, 10 u. 12, 14 u. 16 mm Breite.
3 Winkelschraubenzieher von 6 u. 8, 10 u. 12, 14 u. 16 mm Breite.
2 Kolumbus-Schraubenschlüssel von 210 und 260 mm Länge.
2 Schalttafel-Steckschlüssel für je 3 verschiedene Muttergrössen.
1 stählerner doppelseitiger Anschlagwinkel 310 × 200 mm.
1 Metallsägebogen mit zwei 260 mm langen Blättern.
1 Fuchsschwanzsäge von 360 mm Blattlänge.
1 Stichsäge, doppelzahnig, von 310 mm Blattlänge.
6 Flachzangen mit Seitenschneiden, je eine von 235 und 210 mm Länge, je zwei von 160 und 105 mm Länge.
6 Rundzangen, je zwei von 210, 160 und 105 mm Länge.
1 Brennerzange 235 mm lang.
1 Kneifzange 210 mm lang.
1 Durchschlag.
2 Körner, rund und dreikantig.
2 Kabelmesser.
4 Vorfeilen, je 250 mm lang, ohne Hefte, flach, rund, halbrund und dreikantig.
4 Schlichtfeilen, je 250 mm lang, ohne Hefte, flach, rund, halbrund und dreikantig.
3 Holzraspeln, je 250 mm lang, ohne Hefte, flach, rund und halbrund.
1 Sägenfeile 150 mm lang, ohne Heft.
6 Feilenhefte, 5 mittlere und 1 kleines.



Fig. 235.

1 Ligroinlötlampe mit Zubehör.
5 Stechbeutel 6, 10, 13, 20 und 26 mm breit, mit Heften.
1 Federzirkel 130 mm lang.
1 Federtaster 130 mm lang.
1 Borstenpinsel von 35 mm Durchmesser.
1 Stielbürste von 100×35 mm Bürstenfläche.
1 Feilenbürste von 110×50 mm Bürstenfläche.
1 eisernes Senklot 0·5 kg schwer, mit 10 m Hanfschnur.
2 Feilkloben von 130 und 180 mm Länge.
1 Bandmass 15 m lang, in Lederkapsel.
1 Wasserwage in gusseisernem Gehäuse mit Messingdecke, 250 mm lang, in Schutzkasten, für horizontale und vertikale Messungen.
5 Rohrbiegeeisen für Isolierrohre mit Messingüberzug von 9, 11, 16, 23 und 29 mm lichte Weite.
1 Wellendraht von 20 m Länge, zum Einziehen von Leitungen in Isolierrohre.
2 Setzeisen für Stahldübel.
2 Schraubenschlüssel für Stahldübel.
1 Handbohrmaschine für 2 Geschwindigkeiten, mit Brustbett und Centrierfutter bis 9 mm spannend.
1 Holzkasten enthaltend:
  1 Gaskluppe mit je 1 Paar Backen, je 1 Satz = 2 Stück Gewindebohrer (Vor- und Nachschneider), Windeeisen und Stellstift, für Gewinde von 1/4", 3/8" und 1/2".
1 Holzkasten enthaltend:
  1 Whitworthkluppe mit je 1 Paar Backen, je 1 Satz = 3 Stück Gewindebohrer (Vor-, Mittel- und Nachschneider), je 1 Originalbohrer, 2 Windeeisen und 1 Stellstift, für Gewinde von 1/4", 5/16", 3/8", 7/16" und 1/2".
5 Schneideeisen und 5 Satz von je 2 Stück Gewindebohrer für S & H-Gewinde No. 25, 21, 18, 17, 14, in Kästchen.
1 kleines Kugelwindeeisen mit 4 Löchern.
1 Bohrknarre 420 mm lang.
1 verstellbarer Bohrwinkel aus Schmiedeeisen, mit 2 Mutterbolzen.
1 schmiedeeiserne Schraubzwinge von 200 mm Spannweite.
8 Knarrenbohrer von 6, 8, 10, 13, 16, 20, 23 und 26 mm Durchmesser.
1 stählerne Drahtlehre für Normalleitungen, in Lederfutteral.
1 Ölspritzkanne mit Verschraubung.
1 Washita-Ölstein von 50×155 mm Schleiffläche, in Schutzkasten.
1 Germania-Tourenzähler mit Glocke, in Etui.
1 Schutzbrille in Futteral.
1 Sicherheitsgurt mit Fangleine, Karabinerhaken und Werkzeugtasche.

In den Preis eingeschlossen, aber im Werkzeugkasten nicht verpackt ist:
1 **Handtragekasten** mit Schloss und 2 Schlüsseln.

Von besonderem Vorteil sind ferner bei grösseren Montagen Lochstanzen für Kupferschienen, Kupferschienen-Biegemaschinen und wo viele Löcher in Eisenkonstruktionen zu bohren sind Duplex-Lochstanzen und elektrisch angetriebene Handbohrmaschinen. Besonders bei der Montage von Schiffen, Werften u. dgl. sind die letzteren kaum zu entbehren. Es werden ferner viele Leitern verwendet, deren Konstruktion und Beschaffenheit grösste Aufmerksamkeit zu schenken ist. Die Holme müssen astfrei, die Beschläge sicher und in gutem Zustand sein. Bei Montagen, wo viel geklettert werden muss, sollen Sicherheitsgürtel, in Hochspannungsanlagen Gummihandschuhe und Gummischuhe nie fehlen.

Für die Werkzeugverwaltung ist es wichtig, dem Monteur stets ein genaues Verzeichnis des ihm übergebenen Werkzeuges, über welches er zu quittieren hat, auszuhändigen, damit er es stets kontrollieren kann. Am besten eignen sich doppelt geführte Werkzeugbücher. Die Hauptsache ist, dass der Arbeiter für fehlendes Werkzeug stets aufkommen muss, abgenutztes muss zurückgegeben und kostenlos durch neues ersetzt werden.

156. Maurerarbeiten. Dübel etc.

Nichts verursacht grössere Kosten bei der Anlage einer elektrischen Anlage wie die Maurerarbeiten. Diese lassen sich aber meistens nicht abschätzen, so dass es für jede Installationsfirma am besten ist, diese Arbeiten im Kostenanschlag von vornherein auszuschliessen. Es ist vorgekommen,

dass diese Unkosten beinahe soviel oder doch wenigstens einen ganz gewaltigen Bruchteil der Materialkosten der ganzen Anlage ausmachten. Es ist daher ungemein wichtig, um die Maurerarbeiten möglichst billig ausführen zu können, nur das beste und geeignetste Werkzeug zu verwenden, bei der Wahl der Dübel u. s. w., aber auch schon bei der Veranschlagung darauf Rücksicht zu nehmen, dass die Wände möglichst wenig beschädigt werden.

In der Art der Befestigung von Leitungsträgern, Rollen u. dgl., wird bei Installationen oft so viel gesündigt, dass diesem Abschnitt besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

Sind Löcher zur Aufnahme von Dübeln unter Tapeten anzubringen, so weicht man diese auf, nachdem man die Tapete vorher kreuzweise eingeschnitten hat, und biegt die vier Lappen zurück. Nachdem der Dübel befestigt ist, bringt man die Lappen wieder zurück und klebt sie fest. Besonders in luxuriös ausgestatteten Räumen hat man bei derartigen Arbeiten, sofern sie nicht sogleich mit dem Bau zu gleicher Zeit ausgeführt werden konnten, peinlich zu verfahren.

Um die Wände möglichst wenig zu beschädigen, sucht man mit einer angespitzten Nadel eine Lagerfuge zwischen den Mauersteinen, worauf man

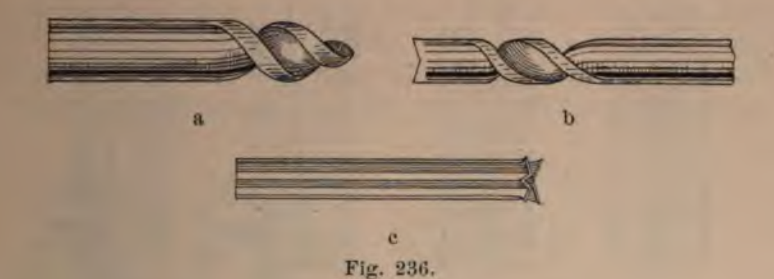


Fig. 236.

das Loch mit einem Telegraphenbohrer vorbohrt und dieses dann mit einem Mauerbohrer (Fig. 236 a) aufweitet. Will man mit diesen Bohrern direkt durch Steine hindurchbohren, so kommt man damit zu langsam vorwärts, wenngleich das Material solcher von Hartmann & Braun A.-G., Bockenheim, hergestellter Bohrer widerstandsfähig genug sein würde. Die zum Bohren der Löcher in Stein vielfach verwendeten Kronenbohrer aus Stahlrohr erweisen sich nicht praktisch genug, weil sie in der Regel nicht aus dem besten Material hergestellt werden. Es kommen daher die von der obengenannten Firma hergestellten Schlagbohrer (Fig. 236 b) zur Verwendung, welche das Profil der Mauerbohrer haben, sowie auch Schlagmeissel aus Kreuzprofilstahl (Fig. 236 c). Man kann mit diesen Werkzeugen gut und schnell arbeiten, da das Bohrmehl von dem Bohrer selbst aus dem Bohrloch herausgeschafft wird. Sind jedoch Kronenbohrer aus vorzüglichem Material erhältlich, wie sie z. B. von den Siemens-Schuckert Werken hergestellt werden, so sind diese, falls es sich nicht um ganz festes Mauerwerk handelt, jedem anderen derartigen Werkzeug vorzuziehen.

Mit Hilfe einer elektrischen oder auch einer Handbohrmaschine, in welche die Bohrer (Fig. 236) eingesetzt werden, werden sehr gute Wirkungen erzielt, doch genügen auch schon leichte, rasche Schläge auf den Bohrer, wobei derselbe gedreht wird. Werden Rohrmeissel verwendet, so muss das Bohrmehl zeitweise ausgeschüttet werden; sie haben den Vorteil, dass weniger

Schmutz verursacht wird, da bei sorgfältiger Arbeit kein Bohrmehl herunterfällt. Um es überhaupt zu verhüten, kann ein kleiner Behälter unterhalb der Bohrstelle angebracht werden, in welchen alle Staubteile fallen.

Die an anderer Stelle beschriebenen Porzellanrollen werden mit Holz- oder Eisenschrauben direkt an die Wand oder in besondere Holzdübel geschraubt, welche rund oder viereckig, stets aber konisch sind und in die Wand eingegipst oder einzementiert werden. Holzdübel dürfen nur für ausgetrocknete Wände verwendet werden und müssen aus hartem Holz, möglichst Buchen- oder Eichenholz, bestehen. Dieselben werden mit der grösseren Fläche zuerst in die Mauer eingesetzt und der freie Raum wird mit Gips ausgefüllt. Es ist gut, diese Dübel einige Millimeter bis unter die Ebene der Wandfläche einzudrücken, damit durch Anziehen der Schraube der Holzpflock wieder festgezogen werden kann, falls sich derselbe später einmal lockern sollte.

Es ist nun vielfach der Versuch gemacht worden, Holzdübel zu konstruieren, bei welchen man das Eingipsen ersparen kann. Sie laufen alle

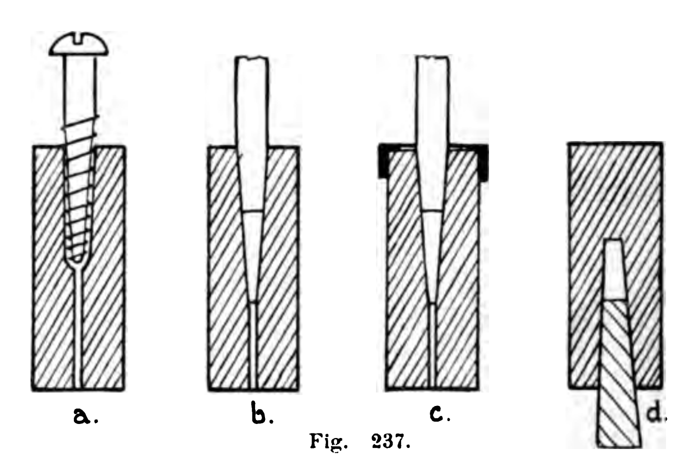


Fig. 237.

mehr oder weniger darauf hinaus, dass ein in ein zylindrisches oder nach hinten nur wenig konisches Loch eingesetzter Holzdübel durch einen Keil an dem in der Wand sitzenden Ende auseinander getrieben wird. Fig. 237 zeigt vier derartige Dübel. Bei der Konstruktion nach Fig. 237a wird in eine zylindrische Bohrung eine Holzschraube eingeführt. Die Bohrung verjüngt sich im hinteren Teil, so dass an dieser Stelle die Holzschraube den Dübel auseinander treibt. Die Dübel nach Fig. 237b werden dadurch befestigt, dass von vorn ein Keil eingetrieben wird, wobei allerdings der Dübel auseinander geht, das Bohrloch aber ausfüllt. Um dies zu vermeiden und den Dübel zusammen zu halten, wird von anderen Fabrikanten am vorderen Ende ein kleiner Eisenring aufgesetzt (Fig. 237c). Schliesslich zeigt Fig. 237d noch einen Holzdübel, bei welchem der Keil hinten eingesetzt und durch Hammerschläge auf das vordere, aus der Wand herausragende Ende eingetrieben wird.

Für das an anderer Stelle beschriebene System der Leitungsverlegung nach Peschel ist ursprünglich eine besondere Art der Befestigung mit Holzdübeln, aber ohne Eingipsen derselben, üblich gewesen. Es wurde mit Hilfe eines Stahldorns (Fig. 238) in die Wand ein Loch geschlagen, indem der Dorn bis zum Griff eingetrieben wurde. Der Dorn wird dann etwas gedreht,

eventuell mit einem Schraubenschlüssel, und wird vorsichtig herausgezogen. Bei sauberer Arbeit ist ein kleines kreisrundes Loch ohne jede Staubentwicklung entstanden, in welches ein dazu passender Holzdübel geschlagen wird; dieser dient dann zur Aufnahme der Schrauben für die verschiedenen Installationsmaterialien des PESCHEL-Systems. Neuerdings werden fast ausschliesslich jedoch Stahldübel verwendet.

So leicht nun an und für sich Holzdübel zu beschaffen und zu montieren sind, so wenig werden sie verhältnismässig noch verwendet, da ihre Nachteile doch zu bedeutend sind. Man nimmt daher soviel wie möglich Metalldübel u. dgl., da sie in jeder Beziehung widerstandsfähiger sind.



Fig. 238.

Die Porzellanrollen werden entweder auf besonderen Flacheisen befestigt, welche ihrerseits in die Wand gegipst werden, oder man verwendet einzelne, besonders konstruierte Dübel verschiedenen Systems, teils zum Eingipsen, teils zum direkten Einschlagen in die Wand, in welche die Schrauben dann eingesetzt werden. Diese Dübel werden gegossen oder gestanzt; der in der Wand zu befestigende Teil ist teils kreuzförmig (Fig. 240), teils

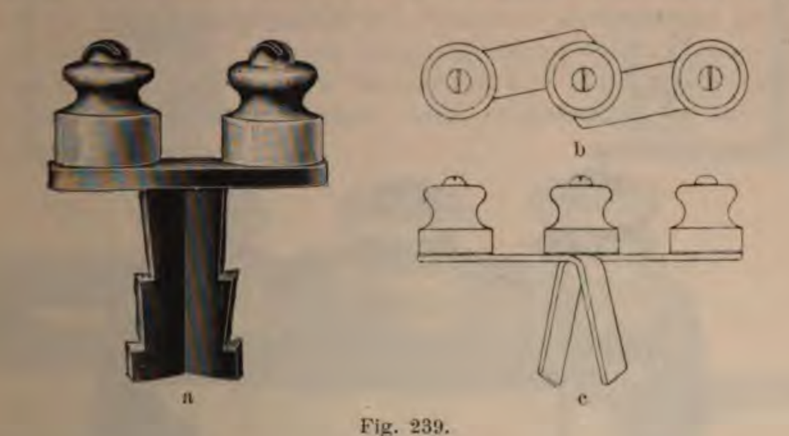


Fig. 239.

winkelförmig ausgebildet, wohl auch mit widerhakenförmigen Ansätzen (Fig. 239 a) versehen.

Fig. 239 b zeigt Dübel der UNION OBERTSROTH, deren Wurzel aus zwei Blechlappen besteht; die in Fig. 239 c gezeigte Art wird durch seitliche Schnitte und Umbiegen der so entstehenden Lappen hergestellt.

Zum Schutz gegen Rosten werden sie mit irgend einer Farbe angestrichen, auch wohl galvanisch verzinkt. Letzteres Verfahren ist vorzuziehen. Wird ein Rostschutzmittel nicht verwendet, so treten später an den Wänden Rostflecke auf, die nicht zu entfernen sind.

Die eisernen Dübel mit ein, zwei oder mehreren darauf genieteten oder aufgeschraubten Rollen werden am meisten verwendet.

Zur Befestigung von Ausschaltern, Umschaltern oder Steckkontakten bei Verwendung von Isolierrohr unter Putz werden nur noch fast ausschliesslich eiserne Dübel verwendet, wie solche in Fig. 240 dargestellt sind, und zwar bezieht sich Fig. 240 a auf Dübel mit einfacher Zuleitung für Ausschalter und Steckkontakte, Fig. 240 b zeigt einen Dübel für durchgehende Leitung, Fig. 241 c einen solchen mit Leitungszuführung durch die Mauer. Die am meisten angewendeten kleinen Schaltapparate können auf diese Dübel befestigt werden; dieselben werden von der Firma Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. fabriziert.



Fig. 240.

Die oben erwähnten Flacheisen werden von den Siemens-Schuckert Werken fabrikmässig in Längen von 2 m hergestellt und alle 50 mm mit einem Loch und Gewinde versehen. Am Montageplatz werden sie dann soweit abgehauen, als sie gerade gebraucht werden. Das Flacheisen wird an beiden Seiten eingehauen und auseinander gebogen, so dass das Ende des Eisens selbst als Steinschraube dient. Dieser Teil wird dann in die Wand eingesetzt.


Fig. 241.

Sind Isolierrollen an Trägern zu befestigen, so werden an diesen besondere Schellen angebracht, auf welche die Isolierkörper befestigt werden. Das Anbohren der Träger ist in der Regel unstatthaft. Eine solche Konstruktion zeigt Fig. 241, die erkennen lässt, dass sie für verschiedene Trägerdimensionen verwendbar ist. Die Rollen selbst sind auf besonderem Eisen befestigt, so dass man sie auch unter einem Winkel zur Längsrichtung des Trägers einstellen kann. Da aber selten eine andere Neigung wie 45° in Frage kommt, so hat man Vorrichtungen vorgesehen, welche den Rollenträger in dieser Lage ebenfalls fixieren können. In der wiedergegebenen Form thut dies der deutlich sichtbare Stift. Eine andere Konstruktion zeigt Fig. 243 a.

In Fig. 242 sind besondere Rollenträger gekennzeichnet, welche verwendet werden, wenn die Leitungen in einem gewissen Abstand von der Decke geführt werden müssen. Eine andere Form haben KÖTTGEN & Co. derartigen Rollenträgern gegeben; sie sind in Fig. 243 wiedergegeben.

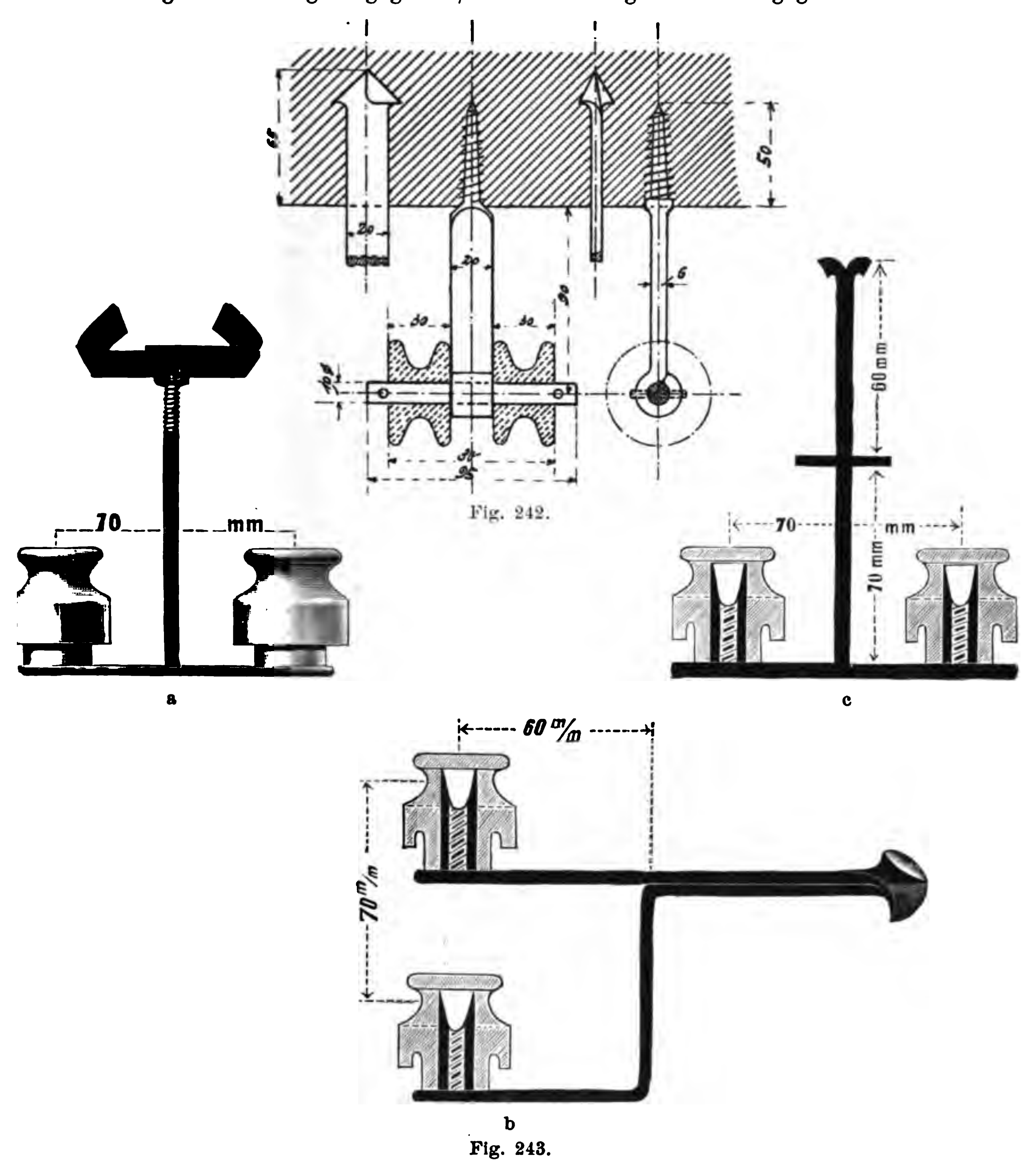


Fig. 242.

Fig. 243.

Von Dübeln für einzelne Rollen und Schrauben seien noch die folgenden beschrieben: BÖDDINGHAUS-Spiraldübel, welche in Fig. 244 dargestellt sind; sie werden dadurch hergestellt, dass ein verzinkter Draht über das Gewinde

einer Holzschraube gewickelt und in einem steileren Gang zurückgewickelt wird. Dadurch wird der Dübel im Mauerwerk festgehalten, wenn die Schraube angezogen wird. Der Dübel wird mit eingeschraubter Schraube eingegipst, da sonst der Gips den Hohlraum ausfüllen würde. Nachdem der Gips festgeworden, wird die Schraube herausgenommen, um dann zur Befestigung der



Fig. 244.

Rolle wieder eingeschraubt zu werden. Erfordernis ist, dass dieselbe sehr gut eingefettet ist, da sie sonst mit dem Dübel fest zusammenrostet und ohne Herausreissen des Dübels ein Auswechseln der Rolle später nie stattfinden kann.

An Stelle der Drahtspirale werden auch Blechhülsen verwendet (Fig. 245a), welche über die Schraube gepresst sind. Die kleinen aufgebogenen Lappen

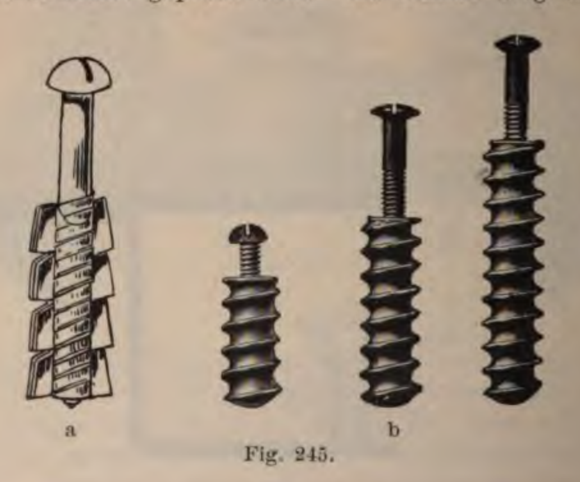


Fig. 245.

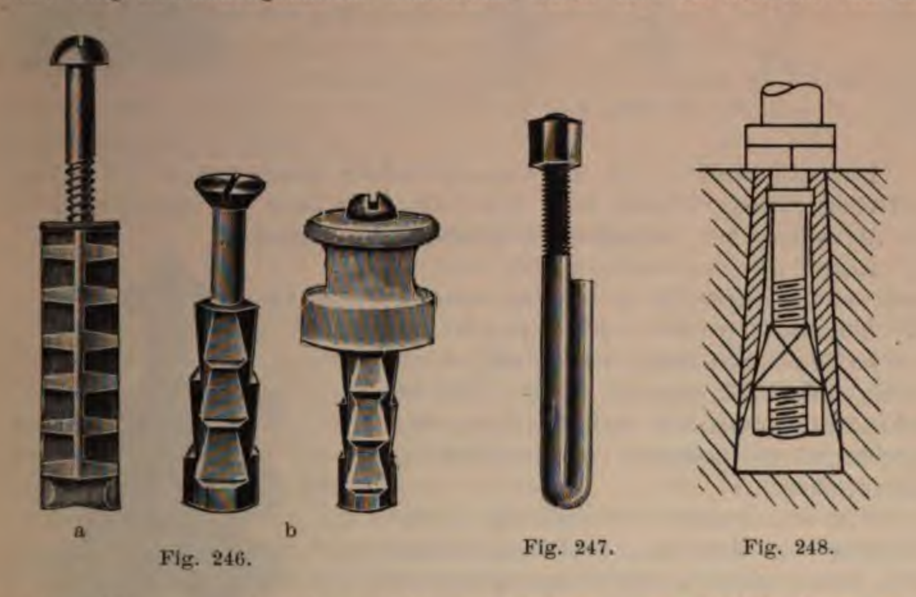
leisten genügenden Widerstand, um den Dübel nach erfolgtem Eingipsen in der Wand festzuhalten. Die in Figur 245b gezeigten Schraubdübel werden wie eine Holzschraube in Holz, Ziegelsteine oder dgl. eingeschraubt, nachdem vorher mit einem Spiralbohrer ein Loch gebohrt war. In Fig. 246a ist ein über die Schraube gepresster Bleidübel abgebildet, welcher ebenso wie

die vorgenannten behandelt wird. Diese Bleidübel können auch gegossen werden. (Fig. 246 b zeigt solche der Firma Köttgen & Co.)

Fig. 247 stellt einen praktischen von der Firma Hartmann & Braun, Bockenheim, hergestellten Dübel dar, welcher in die Wand eingegipst werden kann und sich durch Stabilität auszeichnet. Er soll da Verwendung finden, wo die einschlagbaren, später noch zu besprechenden Stahldübel nicht festsitzen und daher ein anderer Dübel verwendet werden muss.

Bei Verwendung aller dieser Dübelsorten braucht nur ein entsprechend kleines Loch in die Wand gebohrt zu werden, so dass die Installation sehr vorteilhaft ist. Die Dübel werden fertig mit Schrauben in den Handel gebracht.

Gute Dienste leisten für grössere zu befestigende Stützen die Keilverschraubungen[1]) (Fig. 248) von Eiffe & Fehr, Hamburg, deren vier durch einen Ring zusammengehaltene Gussstücke durch eine im hinteren Teil ein-



a b
Fig. 246. Fig. 247. Fig. 248.

gesetzte Mutter auseinander getrieben und fest gegen die Wandungen des Bohrloches gepresst werden.

Zu erwähnen sind noch die sogenannten Krallendübel von F. L. Riedel, Hamburg, welche aus drei in Form eines Dreiecks zusammengestellten Blechstreifen bestehen. Diese sind unten spitz und zu Widerhaken aufgebogen, so dass eine von oben in den Dübel hineingedrehte Holzschraube die Spitzen in die Wand presst und ein genügender Widerstand gegen Zug erreicht wird.

Zur Befestigung von Klemmrollen nach Peschel benutzt man Stahldübel, die mit Hilfe eines Setzeisens direkt in die Wand geschlagen werden. Dies darf aber nur so weit geschehen, dass der Ansatz des Dübels noch etwas aus der Mauerfläche heraussteht (Fig. 249), da sonst beim Festziehen der Rolle der Dübel gelockert werden kann. Keinesfalls darf das Setzeisen noch mit in den Verputz eindringen. Je nach Güte des Mauerwerkes können längere (65 oder 50 mm) oder kürzere (35 mm) Dübel Verwendung finden.

Die meistens verwendeten Stahldübel von Hartmann & Braun A.-G. sind viereckig und hatten ursprünglich eine scharfe Spitze. Diese war aber trotz

1) D. R.-P. No. 65940.

Verwendung besten Materials geneigt, sich umzubiegen, so dass aus diesem Grunde wohl 10 bis 20 % der verwendeten Dübel verloren gingen. Peschel versah die Dübel daher mit einer Scherfläche, welche den Übelstand behob.

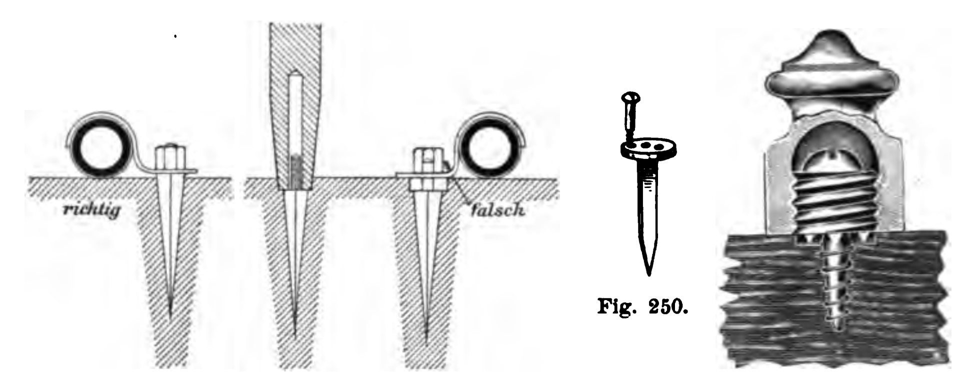
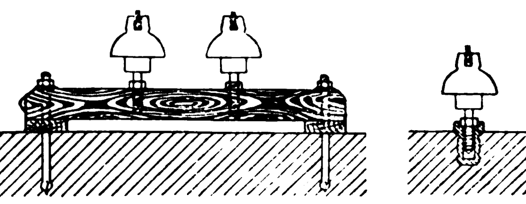


Fig. 249. Fig. 250. Fig. 251.

Die Stahldübel werden mit angeschmiedeter Angel, welche mit Gewinde und einer Mutter versehen wird (Fig. 249), oder auch mit Innengewinde für die Aufnahme einer besonderen Schraube hergestellt.

Ausser den vorerwähnten sind noch mit mehr oder weniger Erfolg einschlagbare Dübel hergestellt worden, die teils nur eine andere Form, dreikantig, fischförmig, spiralförmig oder dgl. erhielten, teils auch aus Rohr mit eingesetztem Holzkern bestanden, welcher letztere bestimmt ist, eine Schraube aufzunehmen.

Von Schuckert & Co. wurde für die Befestigung von Rollen ein Stahlnagel benutzt (Fig. 250), dessen Schaft vierkantig ist und in eine 20 mm lange, meisselförmige Schneide ausläuft. Die Isolierknöpfe oder Rohrschellen werden an dem in Form einer kreisförmigen Platte ausgebildeten Kopfe mittels einer Schraube befestigt. Da drei Schraubenlöcher vorhanden sind, so ist auch bei etwaigem Verziehen des Nagels eine solche Befestigung der Schraube möglich, welche die geradlinige Führung der Leitung nicht beeinträchtigt.



a b c

Fig. 252.

Die Firma SCHANZENBACH & Co., Frankfurt a. M., befestigt ihre mit Innengewinde versehenen Isolierrollen auf einem kleinen Bleikörper (Fig. 251), dessen unterer Rand ausgezackt und somit gegen Verdrehen gesichert ist. Der Bleikörper wird auf irgend eine Art auf der Wand befestigt und dann die oben geschlossene Rolle aufgeschraubt.

Oft wird es wünschenswert sein, eine Isolierung der Befestigungsmittel herbeizuführen, für den Fall nämlich, dass ein Isolator oder eine Rolle nicht ausreichend isolierend erscheint oder sonstige Umstände eine bessere Isolierung erheischen; dann setzt man die Träger der Isolatoren auf einen an und für sich isolierenden Stoff. So stellt Fig. 252a eine doppelte Isolierung durch geölte Holzunterlage dar, während Fig. 252b die doppelte Isolierung durch einen besonderen Porzellankörper zeigt. Derartige Isolierdübel (von den SIEMENS-SCHUCKERT Werken und RENTSCH, Meissen, vertrieben), werden im Innern mit besonderen Muttergewinden versehen oder die Stützen und Bolzen werden direkt eingekittet, eingegipst oder eingeschraubt.

Den gleichen Zweck erreichen SCHANZENBACH & Co. durch den in Fig. 252c dargestellten Isolierkörper, der auf beiden Seiten zur Aufnahme von Befestigungsmitteln geeignet ist.

Wand- und Deckendurchführungen.

157. Durchführungsarten.

Besonders gefährdet sind in jeder Installation diejenigen Stellen, an welchen die Leitungen Wände und Decken durchbrechen, da sie hier teils mechanischen Beschädigungen, teils der Mauerfeuchtigkeit ausgesetzt sind.

Im allgemeinen kann die Durchführung in der gleichen Verlegungsart erfolgen, welche für die Installation innerhalb der betreffenden Räume gewählt ist. Man würde also z. B. für Leitungen, welche auf Rollen verlegt sind, Aussparungen in den Wänden vornehmen, welche es gestatten, die Leitungen auch innerhalb der Wand in dem üblichen Abstand von derselben hindurchzuführen, wobei möglichst unmittelbar vor jeder Seite der Durchführung eine isolierende Befestigungsstelle geschaffen werden muss. Sind die Leitungen in Rohr verlegt, so wird diese Verlegungsart auch bei der Durchführung durch Wände und Decken beibehalten.

Bei der offenen Verlegung von Leitungen kann aber auch für die Wanddurchführung Isolierrohr verwendet werden, welches, damit die Leitungen die Rohre an ihren Enden nicht zerstören, beiderseits mit Tüllen aus feuersicherem Isoliermaterial zu versehen ist. Die lichte Tüllenweite muss so beschaffen sein, dass die lichte Rohrweite an den Austrittsstellen nicht vermindert wird. Aus diesem Grunde würden Porzellantüllen, welche in das Innere der Rohre eingesteckt werden, ihren Zweck verfehlen, dagegen eignet sich die in Fig. 253 gekennzeichnete Art besonders, da sie dem Rohrende noch grösseren Halt verleiht.



Fig. 253.

158. Durchführung durch Holzwände.

Werden Niederspannungsleitungen durch Holzwände geführt, so werden statt der Isolierrohre Porzellanhülsen von beiden Seiten in die Wand eingesetzt (Fig. 254). Alle diese Rohrdurchführungen werden so angeordnet, dass sie 1 cm über die Wandfläche vorstehen, so dass etwa an den Wänden herabfliessendes Tropfwasser in das Innere

der Rohre nicht eintreten kann. Münden die Einführungen ins Freie oder in einen betriebsmässig feuchten Raum, so werden sie an dieser Seite trichterförmig ausgebildet. Wenn es sich um höhere Spannungen handelt werden diese Trichter nach Art der Isolierglocken mit mehreren Mänteln (Fig. 255) ausgerüstet.

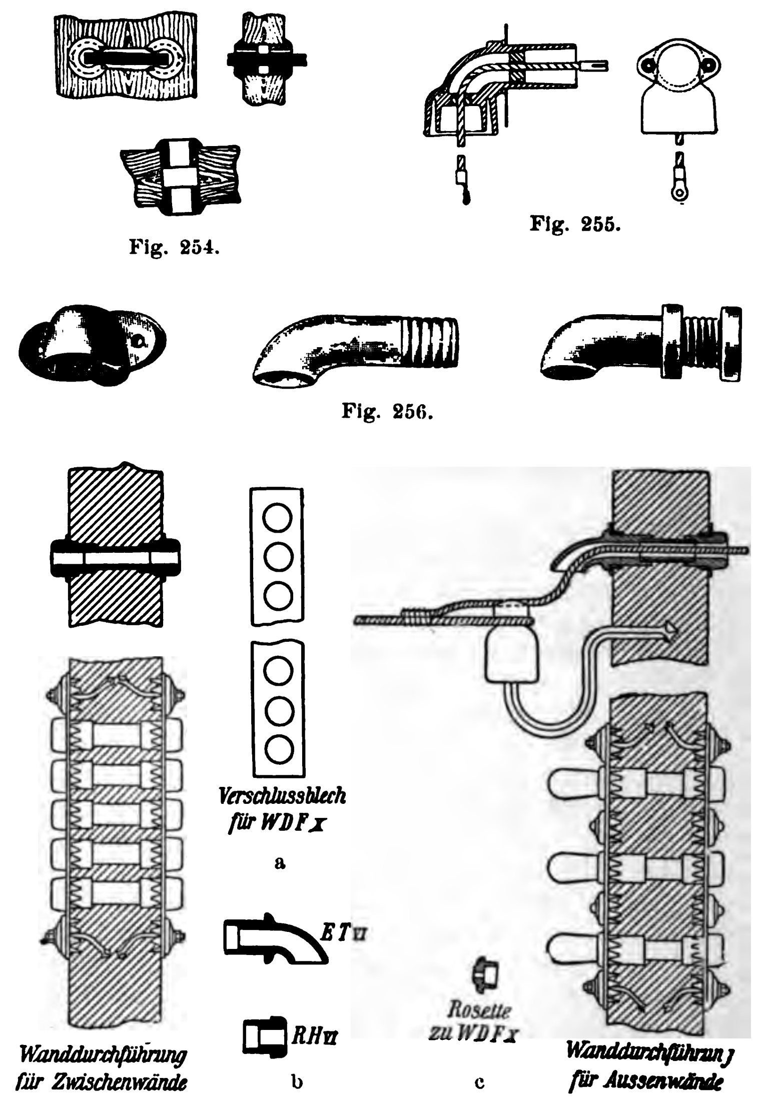


Fig. 254.

Fig. 255.

Fig. 256.

Fig. 257.

159. Wanddurchführungen der Siemens-Schuckert Werke.

Die einfachsten Formen zeigt Fig. 256, während in Fig. 255 eine Wanddurchführung für Eisenwände und für Spannungen bis 10000 Volt dargestellt wird. Um die durchführende Leitung möglichst in der Mitte des Rohres zu halten, sind zwei besondere Führungsstücke eingesetzt.

Die Siemens-Schuckert Werke haben als Wanddurchführung für Spannungen bis 1000 Volt Konstruktionen eingeführt, welche in Fig. 257 erläutert werden. Sie bestehen aus Abschlussblechen *a*, welche entsprechend dem

allgemein zwischen den Leitungen gewählten Abständen alle 50 mm gelocht sind. In diese Öffnungen werden Porzellanhülsen *b* eingesprengt, die, je nachdem es sich um Zwischen- oder Aussenwände handelt, als gewöhnliche Hülsen oder Trichter ausgebildet sind. An jeder Seite der Wand wird ein derartiges Abschlussblech befestigt und die in den Blechen eingekitteten Porzellanteile untereinander durch Hartgummirohre verbunden. Die Befestigung der Abschlussbleche erfolgt mit Hilfe kleiner Rosetten *c*, die auch zum Verschliessen der für die Porzellanteile bestimmten Öffnungen dienen, wenn aus besonderen Gründen, z. B. aus Rücksicht auf die Tragfähigkeit der Wände die Leitungen nicht in Abständen von 50 mm, sondern in grösseren durchgeführt werden sollen.

160. Durchführung für Hochspannungsleitungen.

Für Hochspannungsdurchführungen wird ausser der in Fig. 255 bereits gekennzeichneten Art sehr gern eine freie Durchspannung gewählt.[1]) Die Öffnungen werden mit weiten Porzellanrohren ausgerüstet, die über die Mauerflächen um mindestens 5 cm hervorstehen und denen eine starke Neigung nach aussen gegeben wird, um der Feuchtigkeit freien Abzug zu gewähren. Bei allen derartigen Wanddurchführungen werden die Leitungen, wie aus der in Fig. 258 wiedergegebenen Anordnung hervorgeht, auf beiden Seiten auf Isolatoren abgefangen, um eine Verschiebung der innerhalb der Wand liegenden Leitung, wodurch sie mit den Mauerflächen in Berührung kommen könnte, zu vermeiden.

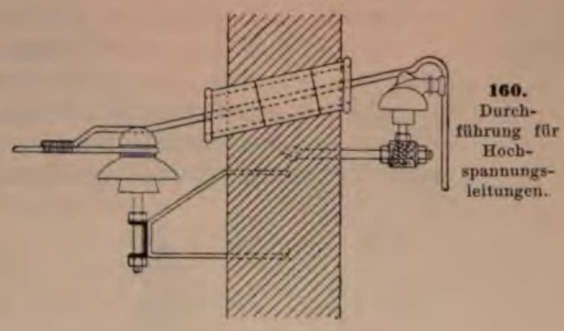


Fig. 258.

Es ist aber nicht erforderlich, die Mauerdurchbrüche mit Porzellan auszukleiden, wenn genügende Abstände zwischen Leitung und Wand innegehalten werden können.[2]) Die üblichen Mindestabstände, mit denen man immer auskommen dürfte, sind aus Tabelle No. 9 ersichtlich.

Tabelle No. 9.

Betriebsspannung	Abstand zwischen Wand und Leitung in cm
1000	5
2000	5
3000	5
4000	10
5000	10
10000	20
20000	20
30000	30
40000	40

Die offenen Durchführungen haben aber, so grosse Vorteile sie auch an und für sich bieten, den Nachteil, dass sie von Vögeln und Insekten als Niststätten ausgesucht werden, wodurch dann häufig Erdschlüsse entstehen. Bei der Verwendung extremer Hoch-

1) Vgl. auch Hausanschlüsse und Einführungen in Gebäuden.

2) Die Sicherheitsvorschriften schrieben bisher bestimmte Abstände vor, die jedoch nicht innegehalten werden konnten. Der in Frage kommende § 24 erhielt daher die folgende Fassung: „Bei Einführung von Freileitungen in Gebäude sind entweder die Drähte frei und straff durchzuspannen oder es muss für jede Leitung ein isolierendes und feuersicheres Einführungsrohr verwendet werden, dessen Gestaltung keine merkliche Oberflächenleitung zulässt. Vgl. ETZ 1904, S. 686.

spannungen wird daher die Einführung auf folgende Art ausgebildet. Die Öffnung im Mauerwerk wird besonders gross gewählt und die Leitungen in der Mitte frei durchgespannt. Eine besondere Auskleidung der Öffnung mit Isoliermaterial findet nicht statt. Dagegen wird sie an beiden Seiten mit Glastafeln abgeschlossen, in welchen für die Leitungen mit geringem Spielraum passende Löcher vorgesehen sind, eventuell bestehen die Platten auch aus zwei Teilen.

Hierdurch werden die Leitungen in der Mitte der Öffnungen gehalten und diese gegen das Eindringen von Vögeln, Insekten und Staub geschützt.

161. Decken-durch-führungen.

Deckendurchführungen sind so auszugestalten, dass die Leitungen gegen mechanische Beschädigungen geschützt sind.

Führen Niederspannungsleitungen von einer Etage zur andern, so werden Eisenrohre verwendet, die mit Isoliermaterial ausgekleidet sein müssen, wenn es sich um Gummibandleitungen handelt, bei der Verwendung von Gummiaderleitungen der Auskleidung aber entbehren können. Da die im Handbereich liegenden Leitungen sowieso geschützt werden müssen, so sind diese

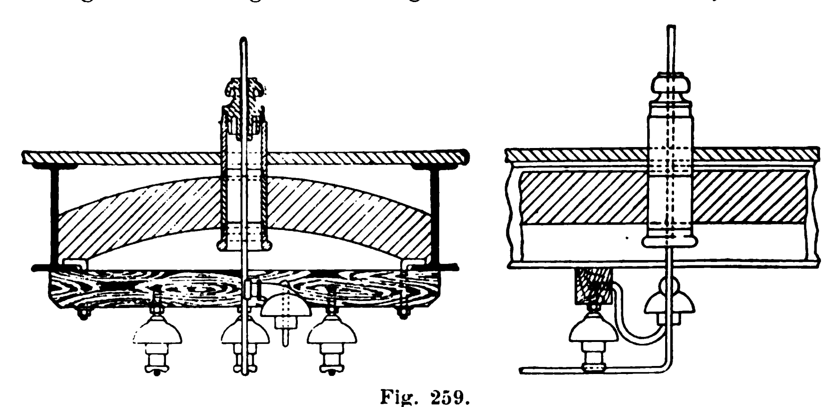


Fig. 259.

von unten durch die Decke kommenden Rohre zweckmässig bis mindestens 2 m über den Fussboden zu führen.

Es kann jedoch auch, z. B. wenn man die Leitungen auf Rollen verlegt, diese Verlegungsart durchgeführt werden, wobei die Leitungen durch einen offenen Spalt laufen. Zum Schutz werden sie dann mit Holz verschalt; jedoch sind die Verkleidungen so anzuordnen, dass sie jederzeit entfernt werden können, um den angesammelten Schmutz, der sich erfahrungsmässig sehr reichlich hinter derartigen Schutzverkleidungen festsetzt, entfernen zu können.

Für Hochspannungsleitungen werden Deckendurchführungen selten gebraucht; wo sie jedoch vorkommen, werden sie in ähnlicher Weise wie Wanddurchführungen ausgeführt. Eine besonders sichere Anwendungsart, wie sie von den Siemens-Schuckert Werken ausgeführt wird, zeigt Fig. 259, bei der unter Verwendung besonders konstruierter Krückenisolatoren der Übergang von der horizontalen zur vertikalen Leitung vermittelt wird.

162. Gasdichte Wand-durch-führungen.

Besondere Wanddurchführungen sind zu verwenden, wenn nicht nur die Leitungen sicher durch Wände geleitet werden sollen, sondern auch ein gasdichter, eventuell auch wasserdichter Abschluss erreicht werden muss. Der erstere Fall kommt am häufigsten bei den nach Akkumulatorenräumen führenden Leitungen, der zweite bei Schiffsinstallationen vor.

Einführungen in Akkumulatorenräume sind aus dem Grunde noch besonders schwierig herzustellen, weil es sich hierbei meistens um eine grössere Anzahl von Leitungen handelt.

Sehr gute Dienste leisten die auf S. 240 beschriebenen und in Fig. 256 und 257 erläuterten Wanddurchführungen in einfachster Art, wenn die Tüllenmündungen nach oben angeordnet und dann durch diese Öffnung die Hartgummirohre der Wanddurchführung mit Isoliermasse ausgegossen werden.

Statt dessen können in die Wand auch zwei Bretter aus hartem, imprägnierten Holz eingesetzt werden, die in geringem Abstand voneinander angeordnet werden. Die in den Hölzern für die Leitungen vorgesehenen Öffnungen werden mit Porzellantüllen, etwa nach Fig. 254, ausgefüttert. Der zwischen beiden Brettern befindliche Raum wird auch in diesem Fall mit Masse ausgegossen. Damit diese aber zwischen den Isoliertüllen und den Leitungen nicht herauslaufen kann, werden die Öffnungen durch Umwickeln der Leitungen mit Isolierband, eventuell auch durch Einstreichen von reinem Gips, der die Leitungen ja nicht angreift, abgedichtet.

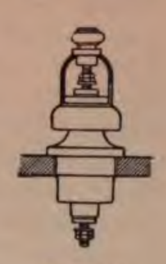


Fig. 260.

Zum gasdichten Abschluss kann auch die in Fig. 260 abgebildete Ausführungsklemme verwendet werden. Sie besteht aus einem Porzellankörper, innerhalb welchem ein Bolzen eingekittet ist, an dem zu beiden Seiten die Leitungen angeschlossen werden. Der Körper wird, wie aus der Figur ersichtlich, in die Wand eingekittet, und zwar ist der für das Auskitten bestimmte Teil unglasiert, um einen besseren Abschluss zu erhalten.

Die Verlegung der Leitungen auf Rollen, Ringen, Glocken und Klemmen.

163. Befestigung durch Krampen.

Als man begann, elektrische Leitungen für Starkstromzwecke zu verlegen, ahmte man die für Klingelleitungen übliche Art der Verlegung nach, indem man die Leitungen mit Hilfe von Krampen an die Wand nagelte. Wurde die Montage sorgfältig vorgenommen, so legte man auch wohl ein Stück Leder oder Fiber unter die Krampe, um die Isolierung des Drahtes nicht zu beschädigen. Derart verlegte Leitungen blieben jedoch nicht trocken, wenn nicht gerade ganz trockene Wohnräume in Frage kamen, so dass Erdschlüsse herbeigeführt wurden; die Leitungen wurden ferner beim Einschlagen der Krampen verletzt, niedrige Querschnitte wohl auch ganz durchgeschlagen, und wenn Hin- und Rückleitung unter dieselbe Krampe gelegt wurden, waren auch direkte Kurzschlüsse die unvermeidliche Folge. Durch das einfache Auflegen der Leitungen auf die Wand war also keine genügende Isolation geschaffen, so dass man sich bald veranlasst sah, die Leitungen von den Wänden abzuheben und auf besonderen Isolierkörpern zu befestigen. Krampen sind daher jetzt nur zur Befestigung an und für sich blanker Leitungen, die betriebsmässig geerdet sind, zulässig, müssen aber so beschaffen sein, dass sie den Draht nicht beschädigen können. Sie sollen aus solchem Metall bestehen oder doch damit überzogen sein, dass sich zwischen ihnen und dem Leiter kein Element bilden kann.

Die Firma Schuckert & Co. in Nürnberg verwendete statt der Krampen als erste ein anderes Mittel und zwar eine polierte Holzkugel, welche zur Aufnahme der Leitungen durchbohrt wurde. Die Kugel wurde mit Hilfe eines Gewindestiftes auf einer besonders befestigten Metallunterlage aufgeschraubt.

164. Rollen für Spannungen bis 500 Volt.

Alle möglichen Konstruktionen, welche als Rollen, Ringe und Klemmen auf den Markt gebracht wurden, suchten dem allgemeinen Bedürfnis abzuhelfen, es würde jedoch zu weit führen, dieselben hier alle zu besprechen, wir beschränken uns daher auf die neueren und zur Zeit üblichen Anordnungen.

Es werden fast ausschliesslich Isolierstücke verwendet, welche aus Porzellan bestehen, dessen Oberfläche glasiert ist. Ab und zu wird Glas verwendet, welches jedoch zu leicht bricht, so dass der Vorteil der Billigkeit bei weitem aufgehoben wird.

In allererster Linie bilden die in den Fig. 261 a und b wiedergegebenen Rollen, die zu Millionen verwendet werden, ein einwandfreies Mittel zur Verlegung der Leitungen. Sie gewähren eine grosse Übersicht über die verlegten Leitungen, gestatten eine schnelle und billige Montage und gewährleisten in normal trockenen Räumen eine gute Isolation des Leitungsnetzes. In der in Fig. 261 a und b gezeigten Form sind sie zulässig bis zu Spannungen von 500 Volt, und zwar können auf ihnen bis 250 Volt Gummibandleitungen, über 250 Volt Gummiaderleitungen verlegt werden. Die Konstruktion dieser Isolierkörper ist nun so getroffen, dass die Leitungen in einem für trockene Räume genügenden Abstand von der Wand gehalten werden. Für Spannungen bis 500 Volt genügen 10 mm und für Spannungen von 500 bis 1000 Volt 2 cm. Die Abmessungen dieser Rollen, wie sie bei den Siemens-Schuckert Werken üblich, ist aus Tabelle No. 10 ersichtlich.

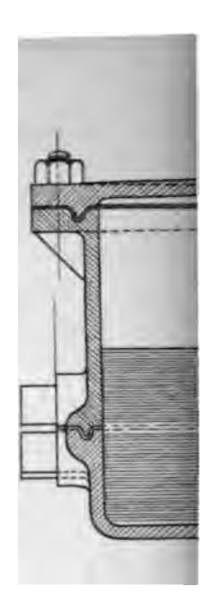
Tabelle No. 10.

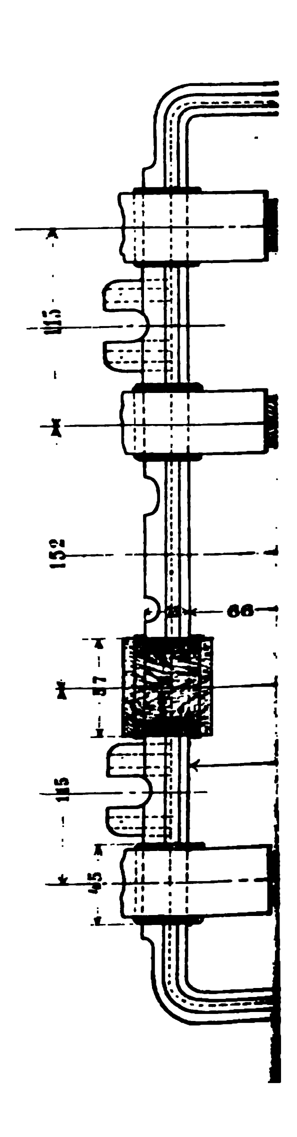
Type	Grösster zulässiger Leitungsquerschnitt mm^2	Höhe	Grösster Durchmesser	Zu verwendende Holzschraube Länge mit Kopf	Zu verwendende Holzschraube Schaftstärke mm
	Rollen nach Fig. 248 a mit Fuss				
F	2·5	14	16	30	4·25
F I	10	21	24	40	4·6
F II	35	28	32	50	5·55
F III	70	35	40	65	6·75
F IV	95	42	48	80	7·0
	Rollen nach Fig. 248 b ohne Fuss				
R	1	10	14	20	4·25
R I	6	15	21	30	4·25
R II	16	20	28	40	4·6
R III	35	25	35	55	6·75
R IV	70	30	42	65	6·75

Die kleinsten Typen der vorerwähnten Rollen werden meistens nur zur Befestigung von Spannungsleitungen hinter Schalttafeln verwendet.

Isolierkörper für zwei oder drei Leitungen vertreiben die Siemens-Schuckert Werke unter der Bezeichnung Nutenrollen. Sie besitzen mehrere Nuten, und zwar werden die Leitungen abwechselnd auf beiden Seiten des Körpers verlegt, auch gern zu Kreuzungen verwendet (Fig. 263).

Werden die Leitungen um Mauervorsprünge oder Träger herumgezogen, so legt man zwischen die vorstehenden Kanten Eckrollen, über welche die





ndb. d. Elektrotech

ür
gen
t.

ng
gs-

R
Sp
bis



Leiter straff verlegt werden können,[1]) ohne dass die Mauer berührt wird. Der festgespannte Draht hält die Eckrollen von selbst in ihrer Lage.

165. Rollen für Spannungen über 500 Volt.

Rollen sind auch für höhere Spannungen zulässig, wenn die diesen Spannungen entsprechenden Leitungsmaterialien verwendet und ein grösserer Abstand von der Wand gewahrt bleibt. Diese Entfernungen ergeben sich aus Tabelle No. 11.

Tabelle No. 11.

Spannung in Volt	Abstand der Leitungen von der Wand in cm
bis 500	1
„ 1000	2
über 1000 bis 5000	5
„ 6000	6
„ 7000	7
„ 8000	8
„ 9000	9
„ 10000	10

a b

Fig. 261.

Fig. 263.

Für Spannungen über 1000 Volt müssen die früher erwähnten Spezialgummiaderleitungen[2]) verwendet werden.

166. Entfernung der Befestigungsstellen.

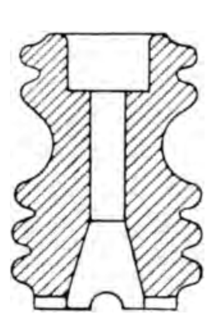
Für alle Rollen, gleichviel welche Leitungen auf ihnen verlegt werden und für welche Spannungen sie bestimmt sind, darf die Entfernung für die Befestigungsstellen nicht grösser als 80 cm sein; nur in dem Fall, dass die Befestigung der Rollen an Decken und Dachkonstruktionen erfolgt, kann sie etwas grösser gewählt werden, wenn die Innehaltung der Entfernung von 80 cm Schwierigkeiten bereiten sollte und die Gebäudekonstruktion eine bequeme Befestigung an Trägern, Balken u. dgl. in etwas grösserer Entfernung gestatten. Hierbei sollte jedoch auch eine gewisse Grenze nicht überschritten werden. Wenn die Anbringung der Befestigungsstellen aber nur in Entfernungen von über 1·5 m möglich ist, verwende man keine Rollen mehr, sondern Isolatoren.

Während für Spannungen bis 500 Volt die Isolierrollen in der vorher beschriebenen einfachen Form ausreichen, macht die Verwendung höherer Spannungen, trotz Benutzung besser isolierter Leitungen, andere Rollenkonstruktionen notwendig, da bei jenen Tropfwasser, welches sich an den Wänden bildet, über den Fuss der Rolle zu den Leitungen gelangen und

1) Siehe ETZ 1902, S. 1133.
2) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 167.

infolgedessen eine leitende Brücke zur Erde gebildet werden kann. Bei den Rollen Fig. 261 b, welche einen runden Fuss haben, liegen die Verhältnisse etwas günstiger als beim geraden Fuss (Fig. 261 a), da bei jenen häufig die Feuchtigkeit vorbeisickern wird. PESCHEL konstruierte deshalb Rollen, welche eine Anzahl von Rillen aufweisen, durch welche der Weg von der Wand zur Leitung vergrössert wird und etwa auftretendes Tropfwasser weit weniger leicht zur Leitung gelangen kann. Die Rollen werden in zwei verschiedenen Mustern ausgeführt, die eine für Befestigung mit durchgehender Schraube (Fig. 264), die andere zur Befestigung mittels eingekitteten Bolzens. Bei der ersteren Konstruktion sind, um den Weg von der Leitung zur Schraube und von da zur Erde zu vergrössern, auch am Kopf Rillen angebracht. In Fällen, wo ein Rosten der Befestigungsschraube erwartet werden kann, sollte die obere Öffnung nach der Befestigung mit Glaserkitt geschlossen werden.

Von demselben Prinzip wie HARTMANN & BRAUN ausgehend, hat H. RENTSCH in Meissen eine Isolierrolle konstruiert (Fig. 265), bei welcher das Schwitz-



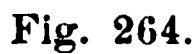


Fig. 264.

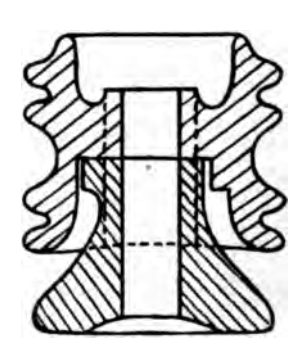


Fig. 265.

wasser durch Kanäle im Innern der Rolle geleitet und nach aussen abgeführt wird. Ob sich diese Konstruktion indessen in der Praxis bewähren wird, ist noch nicht entschieden; es wird abzuwarten sein, ob dieselbe stabil genug ist, um den beim Spannen der Leitung auftretenden Zug auszuhalten. Zudem besteht dieselbe aus zwei Teilen, wodurch dieselbe keineswegs an Festigkeit gewinnt und weniger bequem ist.

167. Das Festbinden der Leitungen an Rollen.

Auf den Rollen werden die Leitungen mit Hilfe von metallenem Bindedraht festgebunden, jedoch ist es erforderlich, die Leitungen an den Befestigungsstellen mit Isolierband zu umwickeln, damit der Draht die Isolierung nicht zerschneidet. Nur wenn Mehrfachleitungen verlegt werden, ist die Verwendung metallener Bindedrähte verboten, da bei diesen Kurzschluss entsteht, wenn der Bindedraht zu straff angezogen und infolgedessen die Isolierung durchschnitten wird, oder wenn sich im Laufe der Zeit die Isolierung durchscheuern sollte. Es werden daher in diesem Fall Fäden aus Baumwolle, Jute oder Garn verwendet. Auch wenn Einwirkungen chemischer Natur zu erwarten stehen, hat sich häufig geteerte Hanfschnur wesentlich besser gehalten als metallener Bindedraht.

Das Anbinden der Leitungen an Rollen erfolgt, indem man den Bindedraht von entsprechender Länge mit der Mitte an die Rolle legt, die beiden Enden unter der Leitung durchführt (Fig. 266 1), über dem Draht kreuzt, sie auf der andern Seite der Rolle zusammenführt und mit der Hand oder einer

Zange fest anzieht. Der Bindedraht wird dann wieder nach der entgegengesetzten Seite geführt, indem das eine Ende über den Leitungsdraht, das andere darunter geführt wird (Fig. 266 2). Beide Drahtenden werden dann $^1/_2$ mal um die Leitung gelegt (Fig. 266 3), auf der anderen Rollenseite zusammengedreht (Fig. 266 4) und die überstehenden Drahtenden schliesslich abgezwickt (Fig. 266 5).

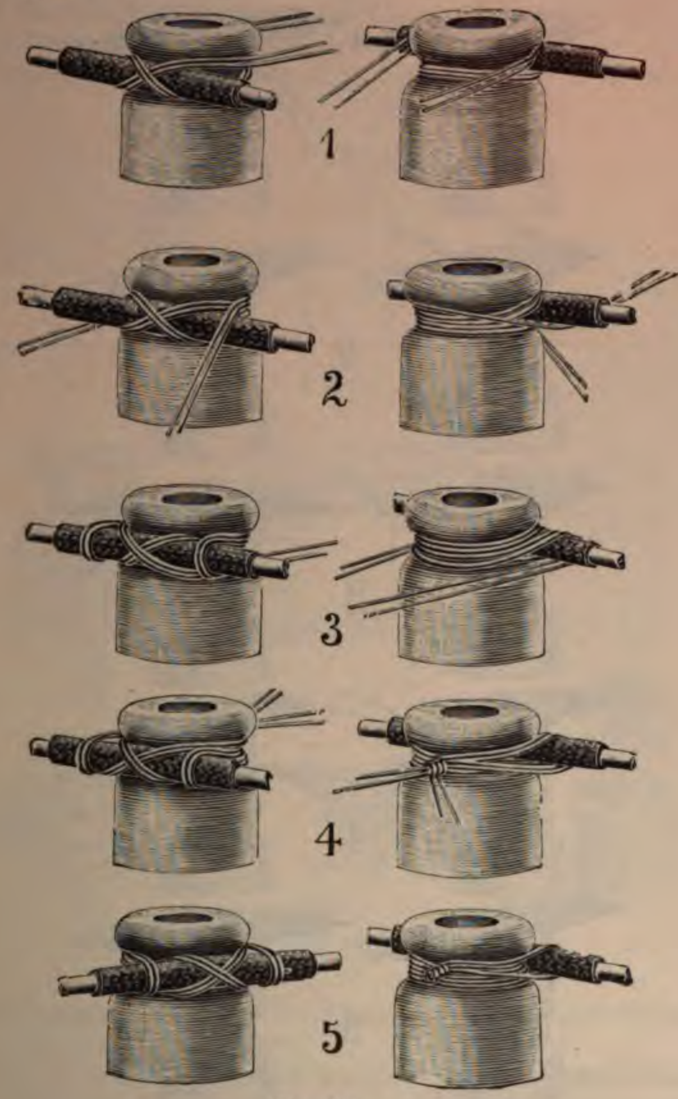


Fig. 266.

Es ist darauf zu achten, dass der Zug der Leitungen auf die in der Rolle sitzende Befestigungsschraube übertragen wird, dass also, hauptsächlich aber an Winkelpunkten, der Bindedraht den Leitungszug nie aufzunehmen hat.

In Fällen, in denen die Leitungen auf Kreuzrollen (Fig. 267) verlegt werden, welche an der Seite zwei und oben eine Vertiefung haben, wird eine Leitung genau wie bei den vorher beschriebenen Isolierrollen an der

Seite befestigt, für die kreuzende Leitung wird jedoch die obenliegende Nute verwendet.

Man befestigt den Leitungsdraht, indem man den Bindedraht um den halben Umfang der Rolle legt, führt ihn unter der Leitung durch und kreuzt ihn oben auf der Mitte derselben (Fig. 267 1); dann schlingt man die beiden

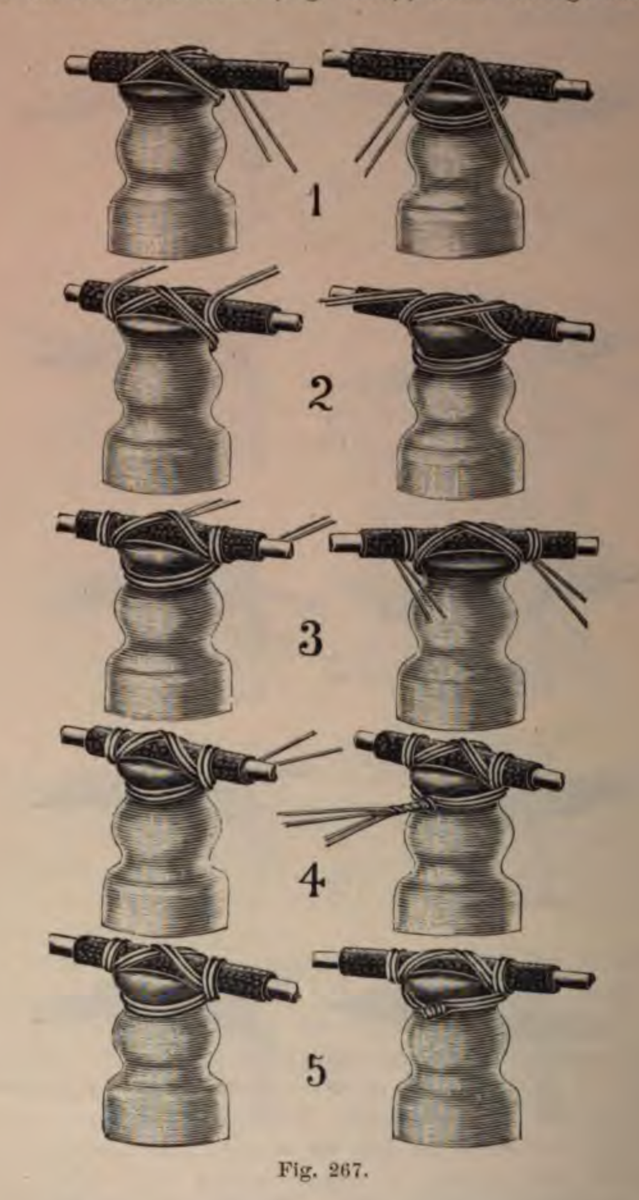


Fig. 267.

Bindedrahtenden seitwärts von der Rolle einmal um die Leitung (Fig. 267 2 u. 3), führt sie in der oberen Seitennute zusammen, verdreht beide Enden miteinander und kneift sie ab (Fig. 267 4 u. 5).

Die Kreuzrollen werden auch für Leitungsverlegung an Mauerecken, vorspringenden Balken u. s. w. verwendet, ferner auch für Verlegung von Zellenschalterleitungen, dürfen aber nicht für stärkere Kabel benutzt werden.

Das Abbinden der Leitungen macht naturgemäss viel Arbeit, so dass auch nach Mitteln gesucht wurde, um sie durch andere Methoden zu ersetzen oder doch die Arbeit soviel wie möglich zu verringern. Unter anderem ist eine Zange konstruiert worden, mit deren Hilfe der Bindedraht nach dem Umlegen schnell festgezogen und abgebunden wird.

Im Gebrauchsmuster No. 183460 wird eine Drahtklemme beschrieben, welche aus Fig. 268 ersichtlich ist; *a* bedeutet ein doppel-S-förmig gebogenes Klemmstück, welches auf der einen Seite die Leitung umfasst, *b* ein Druckstück, welches durch eine Drehung so gegen die Porzellanrolle gepresst wird,

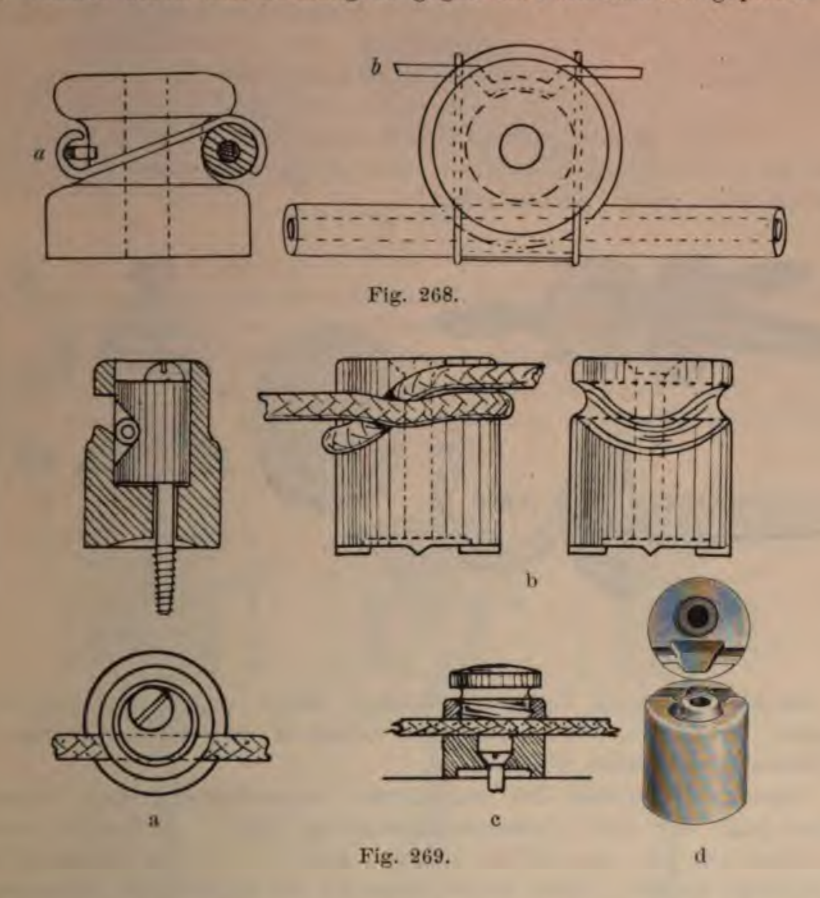


Fig. 268.

Fig. 269.

dass die die Leitung umspannende Klaue auf der anderen Seite der Rolle die Leitung festklemmt.

Bei anderen Anordnungen wird die Anwendung des Bindedrahtes überhaupt umgangen und die Leitung durch eine Klemmvorrichtung auf der Rolle gehalten. Einige derartige Anordnungen zeigt die Fig. 269, und zwar wird die Leitung in der Rolle 269a durch Niederdrücken eines keilförmigen Stückes festgeklemmt; Rolle 269b hat eine nach abwärts gehende Nute, in welche der Draht hereingelegt wird. Durch den Leitungszug wird er festgehalten. Ab und zu müsste die Leitung an einer Rolle festgebunden werden. Die in Fig. 269c wiedergegebene Rolle hat einen schmalen Schlitz, in den die Leitung gelegt wird; eine Porzellanschraube mit breiter Basis wird dann niedergeschraubt und klemmt dieselbe fest.

Fig. 269 d zeigt schliesslich noch die amerikanische Ausführungsform einer derartigen Rolle.

Ausser den vorher beschriebenen Vorrichtungen, bei welchen ein Draht auf eine Isolierrolle geklemmt wird, werden noch vielfach die in Fig. 270 gezeichneten Klemmen verwendet, welche für kleinere Querschnitte eine, für grössere zwei Befestigungsschrauben erhalten. Diese Schrauben haben ausser der Befestigung der Klemme an der Wand noch den Zweck, den oberen Teil der Klemme so auf die Leitungen zu pressen, dass sie dadurch festgehalten werden. Diese Klemmvorrichtungen sind jedoch nur für Niederspannung zulässig, wenn auf ihnen Leitungen verschiedenen Potentials verlegt werden sollen.

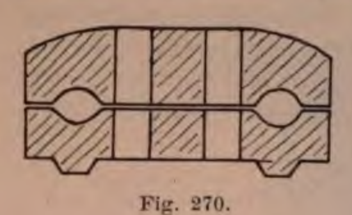


Fig. 270.

168. Peschel-System. So praktisch die Verlegung von Leitungen auf den vorher beschriebenen Rollen an sich auch ist, so unschön sehen sie da aus, wo auf ein gefälligeres Aussehen Wert gelegt werden muss.



Fig. 271.

Die Elektrotechnik verdankt Peschel einige sehr gut durchgebildete Systeme, die in der Verwendung von Schnüren und deren Befestigung in geeigneten Klemmrollen bestehen.

Ursprünglich wurde das sogenannte Ringisolatorensystem verwendet, welches jetzt nur noch vereinzelt Anwendung findet. Es besteht entweder aus ungeteilten oder zweiteiligen Ringen, welche in kleine federnde Haken eingesprengt werden. Diese waren entweder an Nägeln oder Schraubhaken befestigt, mittels deren sie an der Wand gehalten wurden. Die Montage gestaltete sich nun derart, dass erst die Haken befestigt wurden und hierauf die Ringe eingeschoben wurden (Fig. 271 a). Hierdurch wurde dann die Leitung an ihrem Montageort befestigt. Unbequem war bei der Verwendung ungeteilter Ringe das Überschieben derselben. Wesentlich günstiger ist die Verwendung geteilter Ringe (Fig. 271 b), da diese so beschaffen sind, dass die beiden Schnüre an den Befestigungsstellen einzeln gefasst werden. Bei dieser Montageart werden die Leitungen aber nicht festgespannt, sondern hängen im schlanken Bogen von Haken zu Haken. Wünschenswert macht sich indessen, dass an einzelnen Stellen die Leiter sicher befestigt werden, und werden in diesem Falle kleine isolierende Spannschlösser (Fig. 271 c) verwendet, die ebenso wie die Ringe in Haken ruhen und in denen die

Leitung durch einige Schräubchen festgehalten wird. Derart ausgeführte Leitungsanlagen bieten ein gefälliges Aussehen, sind nur insofern nachteilig, als die lose hängenden Leitungen beim Reinigen der Räume häufig beschädigt werden. Ferner bietet die Befestigung des Hakens durch Annageln nicht immer eine genügende Sicherheit. Hierfür wird aber ausreichend dadurch gesorgt, dass statt des Nagels ein Stahldübel Anwendung findet (Fig. 271 d).



a Fig. 272. b

Sicherer gestaltet sich entschieden die Verlegung der Schnüre, nachdem Peschel die in Fig. 272 a abgebildeten Klemmrollen angegeben hatte, die einesteils wegen ihrer grösseren Billigkeit, andererseits aber auch, weil mit ihnen die Leitungen festgespannt werden können, und zwar einzeln, die Ringisolatoren verdrängten. Diese Rollen bestehen aus einem ringförmigen Unter-

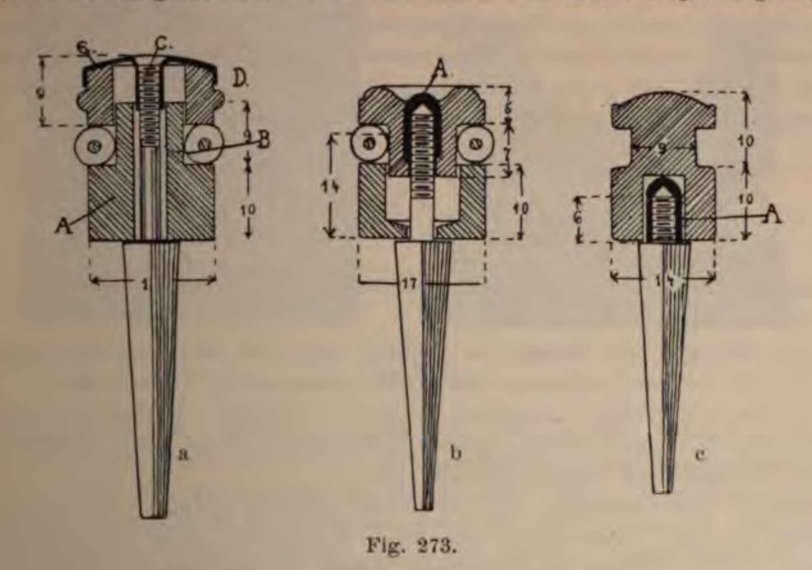


Fig. 273.

teil (Fig. 272 a), in welchen ein zweiter mit einem Zapfen versehener Teil eingreift. Zwischen beiden wird dann eine Doppelschnur festgeklemmt und mit Hilfe einer Holzschraube oder eines mit einem langen Schaft versehenen Stahldübels an der Wand befestigt. Als federnde Unterlage dient eine kleine Metallrosette, welche den Zweck hat, bei Verwendung von Stahldübeln mit Schaft ein Herausziehen desselben und ein zu starkes Anziehen des kleinen Mütterchens zu verhindern. Dieses Klemmensystem hat, trotzdem es wegen seiner verschiedenen Einzelteile auf der Montage nicht ganz bequem ist, die

allerweiteste Verbreitung gefunden. Es wird neuerdings dadurch etwas einfacher gestaltet, dass statt der kleinen Mutter eine mit Gewinde versehene Metallrosette verwendet wird. Gleichzeitig aber ist auch die Rolle selbst geändert (Reformrolle von HARTMANN & BRAUN, Fig. 273 a); sie besteht nunmehr aus einem Fussstück mit zentral aufgesetztem Zapfen, auf den jetzt ein offener Ring aufgeschoben wird, der seinerseits durch die vorher erwähnte Metallrosette abgeschlossen wird. Der Vorteil dieser Reformrolle besteht darin, dass die Doppelschnüre nur so weit aufgedreht werden müssen, als erforderlich ist, um sie über den verhältnismässig schwachen Zapfen überzuschieben.

Bei der in Fig. 273 b dargestellten Art wird keine Metallkappe, sondern eine Mutter A verwendet, die in den oberen Teil eingekittet ist. Fig. 273 c besteht aus einer einfachen Rolle mit einer Aussparung nach unten, in welche eine Mutter A gleichfalls eingekittet wird.

169. Isolatoren in bedeckten Räumen.

Wir haben es nun innerhalb der Gebäude nicht immer mit trockenen Räumen zu thun. In Kellerräumen, Waschküchen, ganz abgesehen von vielen in industriellen Betrieben gelegenen Räumen, herrscht oft eine recht grosse Feuchtigkeit. Hier ist die Verlegung der Leitungen auf Rollen unmöglich, da der Draht stets feucht gehalten werden würde und Isolationsfehler die Folge wären. Je nach den Verhältnissen bieten schon die in Fig. 264 wiedergegebenen Rollen ein annehmbares Verlegungsmittel, ist jedoch starke Nässe vorhanden, so genügen auch diese nicht mehr und an ihre Stelle müssen Isolatoren treten. Da für diese grössere Spannweiten gewählt werden, so ist auch die Anzahl der Befestigungsstellen und somit auch die Anzahl der dem Strom gebotenen Ausweichungsstellen geringer. Sind die Räume hoch, so können bis 250 Volt gegen Erde blanke Leitungen auf ihnen verlegt werden, sie müssen jedoch,[1]) soweit sie nicht unausschaltbare Parallelzweige sind,

bei Spannweiten von mehr als 6 m mindestens 20 cm,
„ „ „ 4 bis 6 „ „ 15 „
„ kleineren Spannweiten „ 10 „

voneinander, in allen Fällen aber mindestens 10 cm von der Wand bezw. von Gebäudeteilen entfernt sein.

Sind dagegen die Räume zu niedrig oder ist die Spannung höher als 250 Volt, so werden Leitungen mit Gummiumpressung verwendet.

Es war nun früher allgemein üblich, in solchen Fällen den Glockenisolator (Fig. 160) anzuwenden, dessen Befestigung jedoch sehr häufig infolge örtlicher Verhältnisse Schwierigkeiten bot.

Solange die Leitungen an der Wand entlang geführt werden, finden gebogene Stützen Verwendung, die weite Ausladung kann gut in Kauf genommen werden. Wenn die Leitungen jedoch an der Decke zu führen sind, ragen die erforderlichen Eisenkonstruktionen zu weit in den Raum herein und wirken bei ungünstigen räumlichen Verhältnissen sehr störend.

BÜTTNER konstruierte, den Nachteil der Glockenisolatoren für diesen Zweck erkennend, einen Isolator, bei welchem er einen Mantel in geringer Entfernung um einen zylindrischen Kern legte (Mantelrolle) und der den Zweck hat, als Abtropfkante zu dienen. Diese Konstruktion wurde von

1) § 28 b der Sicherheitsvorschriften für Niederspannung.

Hartmann & Braun A.-G. vertrieben. Die geringe Entfernung zwischen Mantel und Kern begünstigte jedoch starke Schmutzansammlung, ohne dass die Möglichkeit einer raschen Reinigung gegeben war.

Die Rollen wurden daher von Peschel umkonstruiert, der Mantel schirmartig abstehend angeordnet, so dass die Nachteile der Mantelrolle vermieden werden (Fig. 274). Sie bewähren sich für Spannungen bis 1000 Volt ausgezeichnet und werden hauptsächlich bei der Verlegung der Leitungen in Akkumulatorenräumen, Kellern und Bergwerken verwendet; dem letzteren Umstand verdanken sie ihren Namen „Bergwerksisolatoren".

Da die Schirme verhältnismässig weit ausladen, so wäre durch diese der Abstand zwischen den Leitungen auf eine bestimmte, aber zu weite

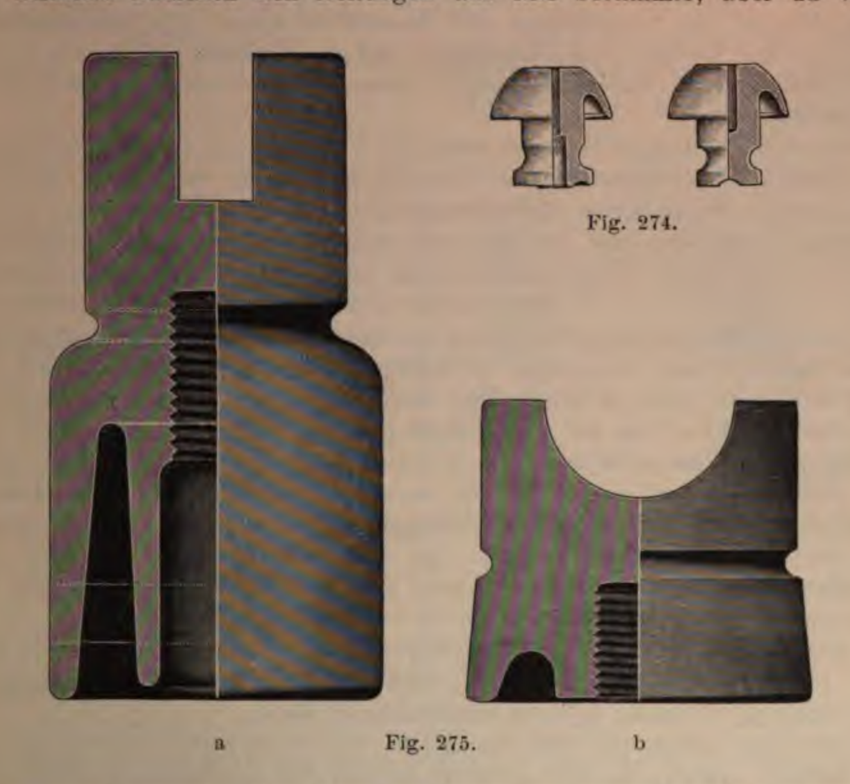


Fig. 274.

a Fig. 275. b

Entfernung begrenzt. Man kann die Leitungen jedoch dadurch wesentlich näher aneinander legen, dass man die Isolatoren gegeneinander versetzt.

Übersteigt die verwendete Spannung 1000 Volt, so werden Glockenisolatoren der üblichen Form verwendet. Für die Verlegung von Kupferschienen dienen die Isolatoren Fig. 275a und für sehr starke runde Leitungen das Modell Fig. 275b.

170. Blanke Leitungen als Schleifleitungen.

Eine besondere Art der Verlegung blanker Leitungen findet da statt, wo, ähnlich wie dies bei den Strassenbahnen geschieht, verfahrbaren Stromverbrauchern, Kranen, Schiebebühnen Strom zugeführt werden soll. Die Leitungsanordnung ähnelt daher auch in der Regel der bei Bahnen üblichen, insbesondere da, wo ein häufiges Verfahren erforderlich ist, indem von blanken Arbeitsleitungen mit Hilfe von Schleifkontakten, Rollen oder Bügeln der Strom abgenommen wird. Ist nur eine streckenweise Fortbewegung des Kranes erforderlich und erfolgt ein Versetzen nur in längeren Zeiträumen,

so werden statt dieser Einrichtung Kabel längs der Kranbahn verlegt, in die in gewissen Zwischenräumen Anschlussdosen (Fig. 132—134, Hdb. VI, 1) eingeschaltet werden, von denen mit Hilfe von Steckern und beweglichen Leitern, die am Kran selbst auf eine Kabeltrommel aufgewickelt sind, die Überleitung des Stromes vom Kabel zum Kran stattfindet.[1]) Beim Verfahren, welches sich in diesem Falle immer nur auf kurze Längen zu erstrecken pflegt, werden die Leitungen von der Trommel langsam abgewickelt. Die Länge dieser beweglichen Leitungen ist so zu bemessen, dass sie bequem nach zwei benachbarten Anschlussdosen langt, wenn der Kran in der Mitte zwischen beiden steht.

Fig. 276 zeigt zwei derartige Konstruktionen der A. E.-G., und zwar ist die erstere mit Schleifringen und Bürsten versehen. Die Anschlusskabel sind mit den Bürsten fest verbunden. Bei der zweiten Anordnung fehlen die Schleifringe, die Anschlussleitungen müssen daher beiderseits mit Steckern ausgerüstet sein.

Die Schleifleitungen bestehen stets aus hartgezogenen Kupferdrähten und werden in Durchmessern von 6—8 mm verwendet. Sie werden zwischen zwei gegen Erde isolierten Endbefestigungen (Fig. 276 d), welche mit Drahtspannern ausgerüstet sind, befestigt und längs ihres Weges in Entfernungen von 5—8 m durch besondere Isolatoren unterstützt. Wird die Kranbahn länger als etwa 100 m, so genügen die beiden Endbefestigungen nicht, um den verhältnismässig grossen Zug aufzunehmen, und man pflegt dann in der Mitte dieser Leitung noch einen besonderen Stützpunkt zu schaffen, der den Zug aufnimmt, aber so ausgebildet sein muss, dass die Stromabnahme in der gleichen Weise wie auf der übrigen Strecke ermöglicht ist. Reisst eine Kranleitung, so ist es in den meisten Fällen wichtig, sie so schnell wie möglich wieder in Stand zu setzen. In zuverlässiger Weise kann eine Lötung stattfinden in der Art, dass die Leitungen, wie Fig. 276 b zeigt, abgesetzt und mit Silberlot verlötet werden. Da aber diese durch die Lötung ausgeglühte Stelle nicht mehr die gleiche Festigkeit haben kann wie die unversehrte hartgezogene Leitung, so ist es vorteilhaft, an der betreffenden Stelle eine der in Fig. 277 f gezeigten Befestigungen anzuordnen. Ein zweiter Riss wird selten an der Lötstelle selbst, vorausgesetzt, dass sie gut ausgeführt ist, auftreten, höchstens in ihrer unmittelbaren Nähe.

Am Kran selbst, wo vom Standpunkt des Führers viele Leitungen nach den Motoren gehen, ist eine grössere Anzahl von Schleifleitungen erforderlich, die aber auch zum Nachspannen eingerichtet werden, etwa wie es Fig. 276 c nach den Ausführungen der A. E.-G. zeigt.

Die Anordnung der Schleifleitungen selbst muss so erfolgen, dass eine bequeme Stromabnahme erfolgen kann. In der Regel bildet ein federndes Glied die Verbindung, damit geringe Senkungen des Geleises u. s. w. die Stromzuführung nicht aufheben. Die Stromabnehmer müssen so gestaltet sein, dass sie an jeder Stelle die Arbeitsleitung berühren. Infolgedessen sind nicht alle Stromabnehmer bei jeder Art der Befestigung der Schleifleitung zu verwenden, sie müssen genau zusammen passen.

In welcher Art dies geschieht, zeigt die Fig. 277. Die Kontakte Fig. 277 a sind nur zur Stromabnahme von nicht unterstützten Schleifleitungen bestimmt; es kann sich daher nur um kurze Strecken handeln. Fig. 277 b

1) Diese Anordnung ist z. B. in den Hafenanlagen in Düsseldorf und Königsberg üblich.

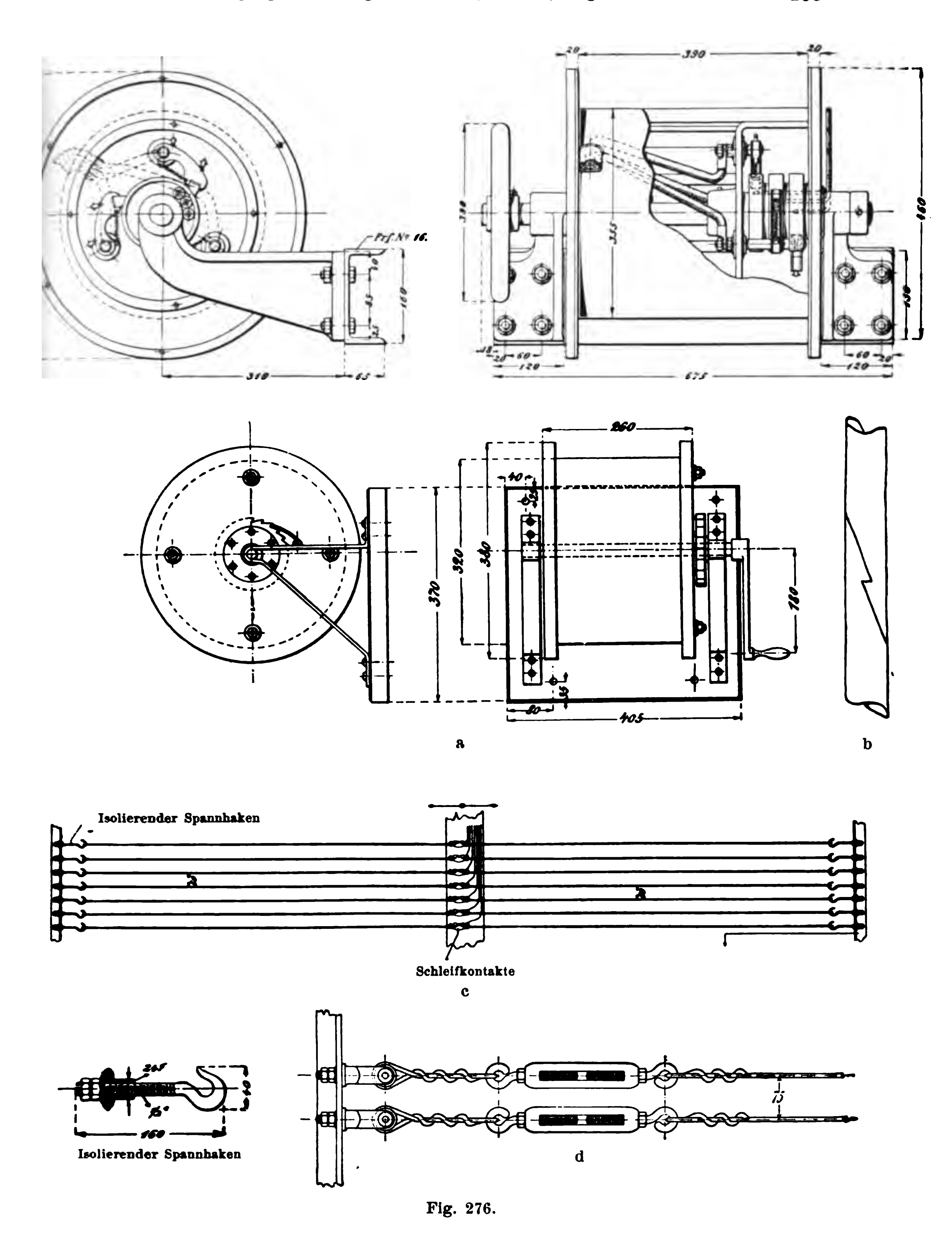

a
b
Isolierender Spannhaken
Schleifkontakte
c
Isolierender Spannhaken
d

Fig. 276.

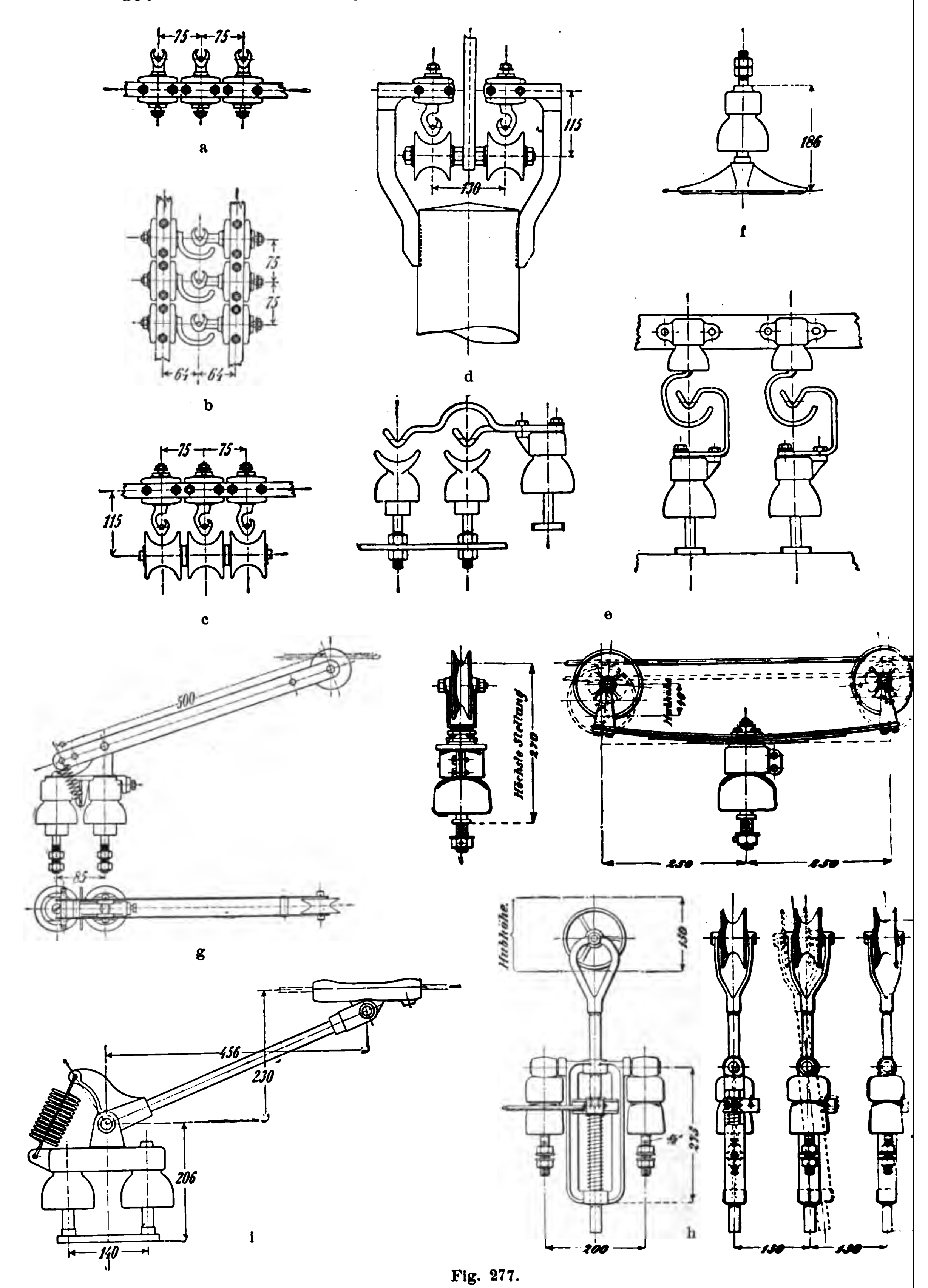

75
75
a
115
130
d
186
f
75
75
64
64
b
75
75
115
c
e
500
85
g
Höchste Stellung
270
250
250
Hubhöhe
130
275
200
h
130
130
456
230
206
140
i

Fig. 277.

zeigt die Unterstützung der Arbeitsleitung durch Drahtstützen, die durch besondere Buchsen gegen das Gestell isoliert sind. Die Stromabnehmer sind so angeordnet, dass sie mit genügendem Spielraum über die Stützen hinweggehen und hierbei die Leitung von ihnen abheben. Während bei dieser Anordnung die Schleifleitungen übereinander liegen, sind sie in der in



Fig. 277 k.

Fig. 277 c und d gezeigten nebeneinander befestigt. In etwas anderer Art findet die Stromabnahme bei Fig. 277 e statt.

Werden die Leitungen nach Art der Strassenbahnleitungen mit Hilfe der Isolatoren (Fig. 277 f) gespannt, so findet die Stromabnahme durch rollende (Fig. 277 g [Siemens-Schuckert Werke], 277 h [A. E.-G.]) oder gleitende (Fig. 277 i [Siemens-Schuckert Werke], 277 k [A. E.-G.]) Kontaktstücke statt. Der rollende Stromabnehmer nutzt den Arbeitsdraht weniger ab als der schleifende. Dagegen vermittelt dieser einen besseren Kontakt, da bei der schleifenden Bewegung der Schmutz abgestrichen wird.

Verlegung der Leitungen in Rohre.

171. Verlegung in Holzleisten.

Das Bestreben, die elektrischen Leitungen dem Auge möglichst zu entziehen, und der Wunsch, dieselben so zu verlegen, dass sie sowohl mechanischen als auch chemischen Einflüssen entzogen werden, führte dazu, besondere Leitungswege zu schaffen, in welche die Leiter eingezogen werden. In früheren Zeiten, die allerdings kaum zehn Jahre zurückliegen, war die Verlegung in Holzleisten allgemein üblich, zumal diese Art eine sehr bequeme Montage bot. Die mannigfaltigen Nachteile, die hauptsächlich darin bestanden, dass durch oft geringe Feuchtigkeit im Holz, sowie durch die in ihm enthaltenen lösbaren Substanzen, eine Zerstörung der Isolierung und schliesslich des Leiters bewirkt wurde, führten dazu, sie allgemein zu verwerfen.[1]) Hat das Holz einmal Feuchtigkeit angenommen, so leitet es, zumal sich auch bei der Zersetzung des Kupferleiters Kupfersalze im Holz festsetzen, es erhitzt und entzündet sich schliesslich. Wesentlich wird diese Gefahr dadurch begünstigt, dass meistens recht weiche Holzarten verwendet wurden, die die Feuchtigkeit begierig aufsaugen. Von der beständigen Gefahr, welche infolge dieser Verlegungsart der Leitungen bestand, überzeugte man sich sehr bald, so dass bei dem Inkrafttreten der ersten deutschen Sicherheitsvorschriften im Jahre 1897 diese Installationsmethode bereits völlig aufgegeben war.

1) Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien, Bd. 14, S. 455, und Dr. C. L. Weber, Erläuterungen zu den Vorschriften für die Errichtung von elektrischen Starkstromanlagen, Berlin 1905, S. 66.

172. Allgemeines über Rohrverlegung.

An Stelle der Verlegung der Leitungen in Holzleisten trat die in Rohre, die aus isolierenden Stoffen, aus Metall oder aus Metall mit isolierender Auskleidung bestehen; sie werden sowohl auf der Wand als unter dem Verputz verlegt. Die Rohrsysteme haben den Zweck, Leitungswege zu schaffen, in denen die Leitungen gegen mechanische oder chemische Einflüsse geschützt sind und in welche sie ein- und ausgezogen werden können, ohne besondere bauliche Veränderungen vornehmen zu müssen. Bei einigen Rohrsystemen gilt als Grundsatz, Eindringen von Wasser in die Rohre möglichst zu vermeiden, während bei anderen hierauf kein Wert gelegt wird, vielmehr durch die Wahl des Leitungsmaterials den schädlichen Einflüssen der Feuchtigkeit die Spitze geboten wird. Allgemein gilt für die Rohrverlegung, dass alle Rohre so weit gewählt werden, dass es möglich ist, die Leitung ohne Anwendung von Gewalt einzuziehen und auszuwechseln. Um dies zu erreichen, ist es erforderlich, die Rohrsysteme vollständig fertig herzustellen, ehe mit dem Einziehen der Leitungen begonnen wird. Die hier und da früher angewendete Montageart, die Leitungen vor Verlegung der Rohre in dieselben einzuziehen, ist durchaus verwerflich, da hauptsächlich an den Krümmungsstellen die Leitungen so fest eingeklemmt werden, dass es nicht möglich ist, sie später wieder zu entfernen, ohne die Rohrstrecken zu verletzen. Aus dem gleichen Grunde ist auch erforderlich, nicht zu enge Rohre zu wählen, und zeigt Tabelle No. 12, wieviel Leitungen von einem bestimmten Durchmesser in die üblichen Rohre eingezogen werden können.

Tabelle No. 12.

Lichte Weite der üblichen Rohre	Grösster zulässiger äusserer Durchmesser der Leitungen bei der Verlegung			
	eines	zweier	dreier	vierer
	Drähte in ein Rohr			
7	4	—	—	—
9	5	—	—	—
11	6·5	4·5	4	3
13·5	8·5	5	4·5	4
16	11	6·5	5	4·5
23	16	9·5	7	6
29	17·5	12·5	11	8·5
36	23	16	12·5	10
48	32	18	16	12·5

173. Anzahl und Querschnitt der in einem Rohr zulässigen Leiter.

Alle Isolierrohre werden in den bereits in der vorigen Tabelle angegebenen Dimensionen hergestellt, jedoch sind die Rohre für 7 mm lichte Weite für Starkstromleitungen nicht zu verwenden, da ihr Durchmesser nicht ausreicht, um gut isolierte Drähte ohne Schwierigkeiten einzuziehen. In das Rohr von 9 mm lichte Weite kann höchstens eine Leitung eingezogen werden; sollen zwei Leitungen in ein Rohr verlegt werden, so muss die lichte Weite mindestens 11 mm betragen.

Ein alter Grundsatz für den Installateur ist der, nie Leiter verschiedener Stromkreise in ein und dasselbe Rohr zu verlegen, da im Fall eines Fehlers in einem Stromkreis auch andere, an jenem Fehler an und für sich unbeteiligte Leitungen in Mitleidenschaft gezogen werden könnten.

Die Anzahl der in einem Rohr ohne Eisenmantel zulässigen Leitungen ist für Gleich- und Wechselstrom auf höchstens drei bemessen, deren Querschnitt aber 6 mm² für jeden Draht nicht überschreiten darf. Sollen Drähte

höheren Querschnitts verwendet werden, so ist jeder Leiter für sich in ein Rohr zu ziehen. Hierdurch wird eine gewisse Sicherheit erreicht, da nur Drähte geringeren Querschnitts unmittelbar aneinander liegen, und die ausgelöste Energie im Fall eines Kurzschlusses nicht allzu bedeutend ist.

Andere Verhältnisse treten aber sofort ein, wenn die Rohre aus Eisen bestehen oder mit Eisen umkleidet sind. Bei Gleichstrom zunächst bleibt es bei dem, was vordem gesagt wurde. Bei Wechsel- oder Mehrphasenstrom aber müssen die Leitungen so zusammengelegt werden, dass die Summe der Ströme in ihnen Null ist.[1]) Ist dies nicht der Fall, so tritt eine Fernwirkung des Wechselstromes auf den Eisenmantel ein, derselbe kann sich beträchtlich erwärmen, ja glühend und hierdurch für seine Umgebung gefährlich werden. Andererseits wird aber auch im eingezogenen Leiter ein Spannungsverlust herbeigeführt, der schon bei geringen Rohrlängen sehr bedeutend sein kann. Es müssen infolgedessen bei Wechselstrom zwei und bei Drehstrom drei Leitungen in dasselbe Eisenrohr verlegt werden, dann ist in jedem Augenblick die Summe der Ströme im Leiter und im Rohr Null und eine Fernwirkung nicht vorhanden. Hierbei kann aber auf den Querschnitt keine Rücksicht genommen werden. Es müssen also auch stärkere Querschnitte als 6 mm^2 zusammengelegt werden. Da man daher oft recht weite Rohre verwenden müsste, so verzichtet man bisweilen auf die Rohrverlegung überhaupt, was aber nur an solchen Stellen geschehen darf, wo dieselbe nach den Vorschriften nicht Bedingung ist (vgl. Tabelle 14, Seite 320 u. 321).

174. Verlegung in Kanäle.

Die Anschauung, dass gut isolierten Drähten nichts passieren kann, wenn sie direkt in die Wand verlegt werden, führte zu einer Konstruktion, welche in Österreich patentiert und vielfach angewendet ist, die aber in Deutschland nach den bestehenden Vorschriften nicht angewendet werden darf. Nach der Patentbeschreibung besteht das Verfahren darin, dass in die Mauern Nuten gestemmt werden, deren Tiefe sich je nach der Stärke des zur Verwendung kommenden Putzes richtet; dieselben werden mit Gips, Zement oder Mörtel ausgefüllt, dann ein dickwandiger Gummischlauch eingelegt und mit derselben Masse überdeckt. Ist die Umhüllung erstarrt, so wird der Gummischlauch, dessen Durchmesser sich beim Anziehen verringert, herausgezogen. In die zurückbleibende Höhlung werden Leitungen mit nahtloser Gummiumpressung eingezogen. In den Fällen, wo der Durchmesser der Rohre 30 mm übersteigt, werden dünnwandige Gummischläuche verwendet, welche aufgepumpt werden.

Um ein Festkleben der Gummischläuche zu verhüten, werden sie vor dem Einlegen in die Nuten mit Schmierseife bestrichen. Die Röhren werden immer in Längen von 1 bis $1^1/_2$ m hergestellt und dementsprechend lange Gummischläuche verwendet.

Erforderlich werdende Abzweigkästen werden in ähnlicher Weise möglichst vor Herstellung der Rohre angefertigt; es geschieht in der Weise, dass zunächst in die Mauern in entsprechender Grösse der Abzweigkästen ein Loch gestemmt wird, auf dessen Grunde ein Holzdübel eingegipst wird. Auf diesen wird nunmehr das Holzmodell für den gewünschten Abzweigkasten mit einer Mittelschraube festgeschraubt, nachdem vorher zwischen Dübel und Modell eine Blechscheibe gelegt wurde. An dem Holzmodell, welches ebenfalls mit Schmierseife zu bestreichen ist, sind vorher so viel kurze Stücke

1) Bisher galt dies allgemein für Metallrohre oder solche mit Metallüberzug, sie ist indessen jetzt auf Eisenrohre beschränkt worden, da sich herausgestellt hat, dass im Messingmantel schädliche Ströme nicht induziert werden.



Fig. 279.

Fig. 280.

1. Isolierrohre ohne besonderen Schutz.

Die Verlegung von Isolierrohren ohne besonderen Schutz darf nicht unter Putz erfolgen, da dieselben den im Mörtel enthaltenen scharfen Ätzlaugen auf die Dauer nicht widerstehen können. Auch das Verlegen der Rohre in Gips, wie es häufig angewendet wurde, um die Einbettung in den schädlichen Mörtel zu umgehen, bietet keinen Schutz für das Rohr, da Gips die Eigenschaft besitzt, viel Wasser anzunehmen und festzuhalten. Liegen die Isolierrohre aber dauernd feucht, so werden sie nach und nach aufgelöst.

Da diese Rohre in bestimmten Fabrikationslängen geliefert werden, so ist es erforderlich, Verbindungsmuffen einzufügen, die entweder aus gezogenem Messing oder aus gleichem Isoliermaterial wie die Rohre hergestellt werden. Die Rohre werden mit einer kleinzähnigen Säge abgeschnitten und der entstehende Grat mit einem speziell hierzu hergestellten Rohrfräser (Fig. 279 a) oder auch eventuell mit einem scharfen Messer entfernt. Nachdem die Messingmuffe etwas angewärmt worden ist, werden die beiden Rohrenden so hereingeschoben, dass sie sich in der Mitte treffen und hierauf die Enden der Muffe vermittels einer besonderen Zange (Fig. 279 b) gewürgt. Hierdurch entsteht die in Fig. 279 c gekennzeichnete Verbindungsstelle.

Liegen die Rohre jedoch nicht in absolut trockenen Räumen, so werden die bereits erwähnten Muffen aus Isolierstoff verwendet, mit deren Hilfe die Verbindungsstelle dann in der gleichen Art wie beim Hartgummirohr hergestellt wird. Die Isolierrohre können, wenn sie etwas angewärmt werden, in geringe Krümmungen gebogen werden. Sind aber schärfere Krümmungen erforderlich, so müssen die für diesen Fall besonders vorgesehenen Ellbogen, Kröpfungsstücke u. dgl. Anwendung finden. In der Regel sind diese bereits mit einer angesteckten Muffe versehen, in welche dann die Rohrenden eingeführt werden.

Abzweige werden innerhalb von Dosen hergestellt, welche aussen mit Ansätzen versehen sind; an diesen werden die Rohre mit Verbindungskitt befestigt. Aus der Fig. 280 sind die üblichsten Ausführungen zu ersehen. Neuerdings bringt Bergmann auch geteilte Dosen in den Handel, wie sie Fig. 281 zeigt.

Um es zu ermöglichen, Rohre stärkeren Durchmessers an solche geringerer lichter Weite anzuschliessen, dienen Reduktionsbuchsen aus Isoliermaterial, welche in den grösseren Durchmesser eingekittet werden. In der Öffnung der Buchse wird dann das engere Rohr befestigt (Fig. 282).

2. Isolierrohre mit Messingüberzug.

Da die vorher beschriebenen Isolierrohre keinen ausreichenden Schutz gegen Feuchtigkeit bieten, werden dieselben mit einem Messingüberzug bekleidet, der zwar nicht besonders stark, dem Rohre jedoch für viele vorkommende Fälle eine genügende Festigkeit verleiht. Derartige Rohre können auch unter Verputz verlegt werden.

Um mit diesem Rohr Verbindungsstellen herzustellen, ist es erforderlich, dass der Messingüberzug auf eine Länge von etwa 15 mm entfernt wird. Dies geschieht am zweckmässigsten mit einem Schneide-



Fig. 279.

Fig. 280.

apparat (Fig. 283). Das Rädchen *a* wird durch einen Druck auf den federnden Hebel *b* abgehoben und das Isolierrohr auf den dem Schneiderädchen gegenüberstehenden Führungszapfen *c* gesteckt und durch Drehung des Werkzeuges der Messingmantel abgetrennt. Um zu erreichen, dass das Werkzeug nur den Messingmantel, nicht aber auch das Isolierrohr zerschneidet, dient die Stellschraube *d*. Dieser Abschneider kann für alle Rohrdimensionen verwendet werden, nur ist es erforderlich, der lichten Weite entsprechende Führungszapfen aufzusetzen. Nach dieser Vorarbeit werden die Enden des Rohres, ungefähr 5 mm vom Ende desselben entfernt, mit etwas angewärmtem Verbindungskitt bestrichen und nunmehr in die aus Messingblech hergestellte Verbindungsmuffe eingeführt. Um eine gute Verbindung herstellen zu können, ist es erforderlich, dass die Stossfuge möglichst in der Mitte der Muffe liegt. In die Messingmuffe selbst ist von vornherein Verbindungskitt eingeschmiert, der nach dem Einführen der Rohre durch Anwärmen mit einer Lötlampe zum Schmelzen gebracht wird. Hierdurch wird eine hermetische Abdichtung erzielt und die fertige Muffe hat die Gestalt von Fig. 284 angenommen. Die Verwendung einer Zange zur Herstellung einer Verbindung, wie dies bei dem Isolierrohr ohne Messingüberzug geschieht, ist hier ausgeschlossen.





Fig. 281.



Fig. 282.

Die Rohre mit Messingüberzug können nicht ohne weiteres aus freier Hand gebogen werden, es dient vielmehr hierzu eine besondere Biegezange, in deren muldenförmigen Teil das Rohr eingelegt wird. Hierauf werden mit der Schneide der Zange (Fig. 285) im Messingmantel Einknickungen gemacht, wodurch derselbe auf der Seite gekürzt wird, nach welcher das Rohr gebogen werden soll. Durch die Anbringung einer mehr oder weniger grossen Anzahl dieser Eindrücke kann das Rohr in jede beliebige Kurve gebracht werden. Damit das im Messingmantel befindliche Isolierrohr beim Biegen nicht platzt,



Fig. 283.

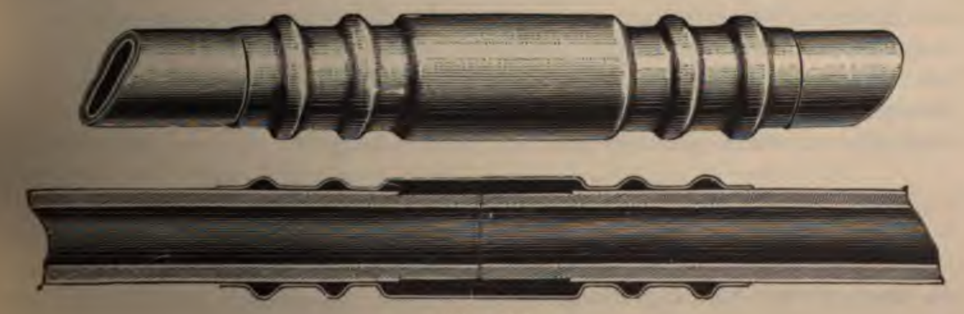


Fig. 284.

werden die zu biegenden Teile vorher gelinde angewärmt. Im übrigen sind auch für dieses Rohr alle möglichen Rohrkrümmer, Übergangsbogen u. s. w. erhältlich.

Genau die gleichen Abzweigdosen u. s. w., wie sie für Isolierrohre ohne Messingüberzug hergestellt werden, werden auch für diejenigen mit Messingmantel verwendet, nur besitzen sie für diesen Zweck den gleichen Schutz aus Messingblech.

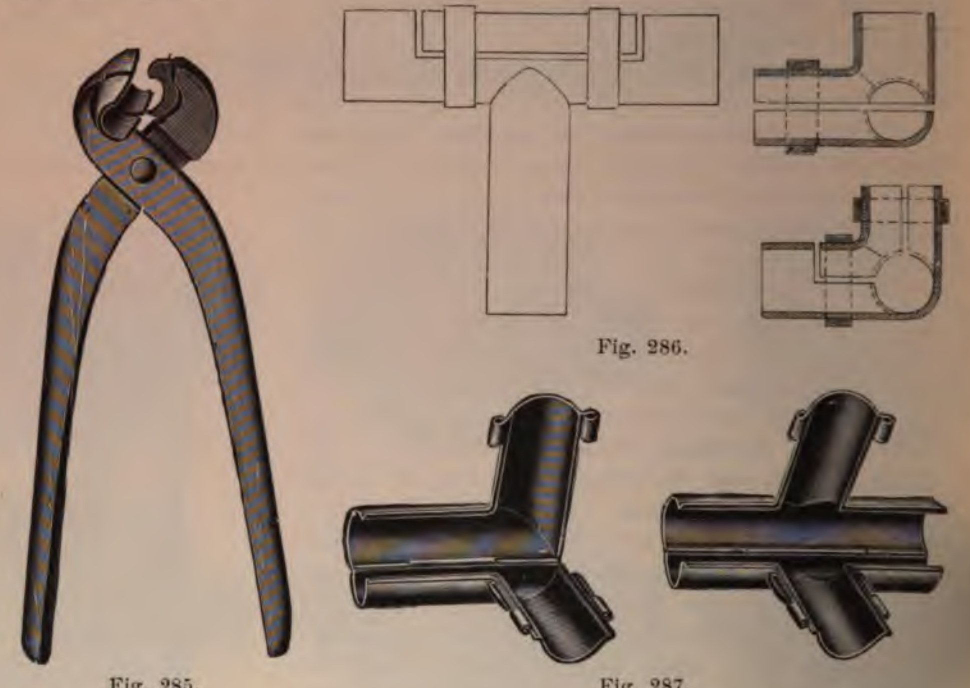


Fig. 286.

Fig. 285.

Fig. 287.

Um jedoch auch an den Bogenstücken Zugang zum Rohrinnern zu haben, hat Bergmann die in Fig. 286 gezeigten Modelle konstruiert, bei denen einzelne Teile durch Spannringe lösbar angeordnet sind.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, welche die Fabrikation von Isolierrohren ebenfalls aufgenommen hat, fertigt für den gleichen Zweck aufklappbare Verbindungsstücke (Fig. 287).

3. Isolierrohre mit Mantel aus Blei.

In vielen Fällen treten an die Stelle des Messingmantels andere Metalle, hauptsächlich wenn chemische Einflüsse, welche das Messing angreifen, zu befürchten sind. Häufig wird in diesem Falle ein Mantel aus Bleiblech verwendet, der, fest um das Rohr gepresst, einen sehr guten Schutz gewährt. Auch Blei-Antimonlegierungen finden Verwendung.

4. Isolierrohre mit Stahl- oder Eisenmantel.

In allen Fällen, wo ausser einem gut isolierenden Wege für die Leitungen ein mechanischer Schutz verlangt wird, bieten Isolierrohre mit Stahlpanzer ein gutes und zuverlässiges Verlegungsmittel.

Die Verlegung derselben erfolgt ähnlich wie die der Gasrohre. Sie werden durch Muffen zusammengeschraubt und die Schraubstellen durch Mennige abgedichtet. Diese Rohre können auch unter Putz verlegt werden und ist ihr Stahlmantel, welcher eine Stärke von 1·5 bis 2 mm besitzt, ausreichend, um das Rohr gegen das Eindringen von Fremdkörpern zu schützen. Auch in solchen Räumen, in denen sonst eine andere Verlegungsart wenig Aussicht auf Erfolg hat, weil z. B. die chemischen Bestandteile derartige sind, dass ihnen keine Isolierung widersteht, ist Stahlpanzerrohr einwandfrei zu verwenden, auch in Bergwerken, Tunneln, zu Brückenbeleuchtungen und nicht zum mindesten in den Kessel-, Lade- und Kohlenräumen der Schiffe bietet es eine bequeme und sichere Verlegungsart.

Die Isolierrohre mit Stahlpanzer lassen sich nicht ohne weiteres biegen, dagegen ist es möglich, dieselben mit Hilfe einer Biegevorrichtung im kalten Zustande in die gewünschte Kurve zu bringen. An und für sich sind auch für dieses Rohr Bogen, Krümmer und besondere Kurvenstücke vorgesehen,

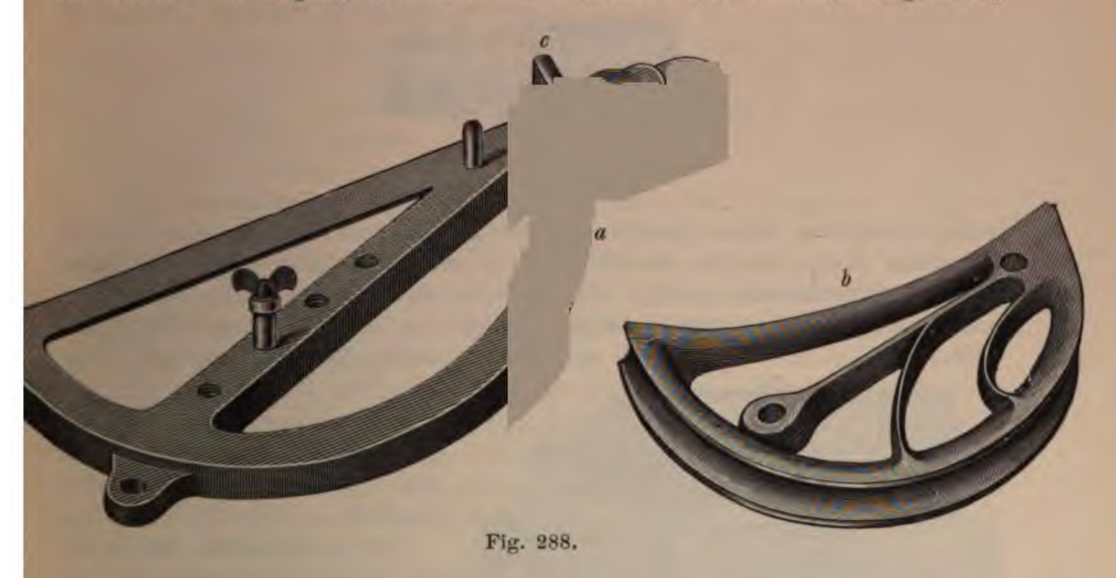


Fig. 288.

die im allgemeinen Verwendung finden werden, wenn nicht infolge der Örtlichkeit andere Kurven erforderlich sind, die besonders herzustellen wären.

Die aus Gusseisen hergestellte Biegevorrichtung (Fig. 288) besteht aus einer Grundplatte *a*, zu welcher vier verschiedene Formstücke *b* gehören, die für die verschiedenen Rohrstärken entsprechend an ihrem Umfang ausgearbeitet sind. Je nach Bedarf der Rohrstärke und des Radius wird eines dieser Formstücke auf der Grundplatte festgeschraubt, das zu biegende Rohr gegen das als Widerlager dienende Stück *c* gelegt und das Rohr mit der Hand um das Formstück herumgezogen. Will man bei den Rohren stärkeren Durchmessers einen verhältnismässig scharfen Winkel biegen, so empfiehlt es sich, auf einem Formstück einen grösseren Radius vorzubiegen.

Wie bereits vorher gesagt, werden die Rohre durch Verbindungsmuffen zusammengeschraubt. Stossen die Rohre von verschiedenen Seiten zusammen, so dass eine gewöhnliche Muffe nicht verwendet werden kann, so werden um die Hälfte längere Schraubmuffen gewählt, die zunächst ganz auf das eine Rohr aufgeschraubt werden; dann werden die von zwei verschiedenen

Seiten kommenden Rohre zusammengestossen und hierauf die Muffe über das zweite Rohrende zurückgeschraubt. In diesem Fall kann jedoch auch ein Verbindungsflansch (Fig. 289) Verwendung finden, der durch eine Zwischenlage von Gummi abgedichtet wird.

Da es vorkommen kann, dass für verschiedene Räume auch verschiedene Rohrsysteme Verwendung finden, z. B. wenn in dem einen

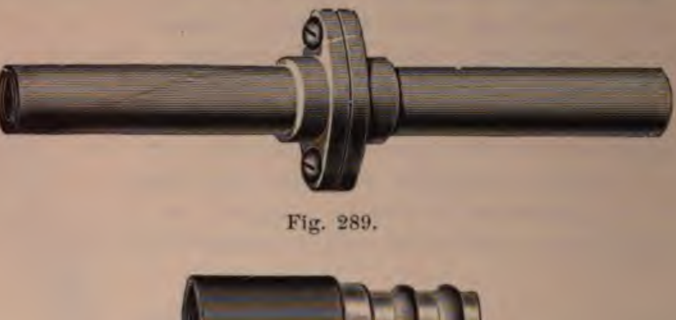


Fig. 289.



Fig. 290.

ganz trockenen Raum Isolierrohr mit Messingüberzug, in dem nebenliegenden durch die in demselben betriebene Fabrikation aber feuchten Raum Stahlpanzerrohr verlegt werden soll, so werden Muffen verwendet, welche es gestatten, diese beiden Rohrsysteme zu verbinden. Eine derartige Verbindungsmuffe zeigt Fig. 290.

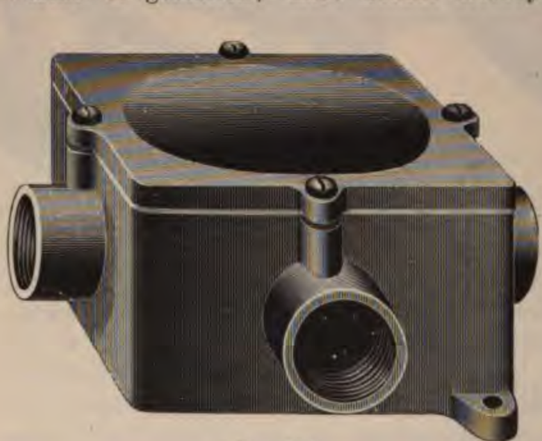


Fig. 291.

Reduktionsmuffen sind als Verschraubmuffen mit innerem und äusserem Gewinde ausgebildet.

Entsprechend der Konstruktion des Rohres an sich müssen auch die Abzweigkästen (Fig. 291) hergestellt sein; dieselben bestehen aus gusseisernen Körpern, in deren seitliche Stutzen die Rohre eingeschraubt werden. Der Deckel wird gegen das Gehäuse durch eine Gummiplatte abgedichtet.

177. Montage von Isolierrohren.

Bergmann & Co. geben noch bezüglich der Montage der Isolierrohre die folgenden schätzenswerten Mitteilungen: Ist durch unvorsichtiges Einputzen einer Dose oder auf irgend eine andere Weise Wasser in eine Rohrleitung eingedrungen und die Lage der betreffenden Leitungsstrecke eine solche, dass das Wasser nicht ablaufen kann, so ist ein Austrocknen der in Frage kommenden Rohrleitung nach folgendem Verfahren zu bewirken:

Das zum Einziehen der Drähte in die Rohrleitungen dienende Stahlband wird in die Rohrleitung eingeschoben, an der Öse desselben wird ein der

Rohrweite entsprechend starkes Bündel Baumwollgarn (Lampendocht) befestigt und letzteres mit dem Stahlbande durchgezogen. Diese Prozedur ist so lange zu wiederholen, bis das Baumwollgarn keine Spur von Feuchtigkeit mehr zeigt. Alsdann lasse man die Rohrleitung so lange als möglich an beiden Enden offen, und ein Versuch wird zeigen, dass die Rohrleitung so weit trocken geworden ist, dass die Leitungsdrähte ohne Bedenken eingezogen werden können.

Dieses Verfahren benutze man überall dort, wo Rohrleitungen unter Fussböden, in Cementputz oder Mauerwerk horizontal verlegt sind, um ein Demontieren und Neuverlegen einer Wasser enthaltenden, aber sonst gut verlegten Rohrleitung zu vermeiden.

Genügende Luftzirkulation in den Leitungsröhren bei einigermassen gleicher Temperatur in den durch die Rohrleitung in Verbindung gebrachten Räumen ist notwendig.

Bei grossen Temperaturunterschieden dichte man das in der höheren Temperatur liegende Rohrende gut ab.

Bei Neubauten müssen so lange als möglich nach dem Verputzen die Dosendeckel entfernt werden, damit die Rohrleitungen sich während dieser Zeit gut ventilieren. Sollten jedoch nach Fertigstellung der Installation die Wände noch nicht genügend ausgetrocknet sein, so lasse man auch jetzt noch die Dosen offen.

Bei Neubauten, in denen die Wände mit einer Gipsschicht, Marmor, Marmorstuck u. dergl., sowie mit Zink, Spiegelplatten u. s. w. belegt werden, ist es sehr zu empfehlen, die Mauerkanäle, die für die Aufnahme der Rohre bestimmt sind, vorher mit heissem Goudron (Teer) zu streichen, auch, wenn möglich, dem bereits verlegten Rohr einen Goudronanstrich zu geben; den Rohrkanal verdecke man mit einem Streifen Dachpappe. Diese Manipulation halten wir für erforderlich, weil der Wandverputz aus echtem oder imitiertem Marmor, sowie Spiegelplatten u. dergl. die Verdunstung hemmen und deshalb die Mauerfeuchtigkeit auf lange Zeit andauert.

Bei Stuckkehlen sind die Abzweigdosen genügend tief unterhalb der Decke anzubringen, so dass sie nach Fertigstellung des Putzes unterhalb der Kehle sitzen.

Bei Tapetenwänden ist es zulässig, nach Verlegung der Rohre die Mauerkanäle nicht zu verputzen, sondern sie durch einen leichten Stoff zu überspannen. Dadurch wird die direkte Einwirkung der Feuchtigkeit verhindert, und Spiegelhaken oder Bildernägel u. s. w. können in die Rohrleitungen nicht eingeschlagen werden, weil man die Lage der Rohre stets feststellen kann.

Wir haben die Beobachtung gemacht, dass bei offenen Neubauten während strenger Kälte an den Messingmuffen der schwarzen Isolierrohre, sowie beim Messingmantel der Messingrohre und -Ellbogen infolge starker, durch die Kälte verursachter Zusammenziehung, Längs- und Querrisse entstanden sind. Dies verhindert man durch rechtzeitiges Einputzen, oder bei schwarzem Rohr durch Verwendung von Muffen aus Isoliermaterial.

Das Schneiden der Rohre auf Gehrung ist stets streng zu vermeiden, da ein unbedingt sicheres Abdichten der Gehrung völlig ausgeschlossen ist; auch widerspricht eine Gehrung in der Rohrleitung den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, § 18 und § 26a, weil dadurch die Auswechselbarkeit der Leitungsdrähte stets illusorisch wird.

Bei salpeterhaltigen Steinen ist Stahlpanzerrohr oder Rohr mit Eisenarmierung allen anderen Verlegungsmaterialien vorzuziehen.

178. Abzweigscheiben für die Rohrverlegung.

Zum Einlegen in seine Abzweigdosen bringen BERGMANN & Co. Porzellanscheiben in den Handel (Fig. 292).

Die SIEMENS-SCHUCKERT Werke haben Rohrdosen konstruiert, welche eine Vereinigung der bisher üblichen Abzweigdosen mit den in diese eingelegten Abzweigscheiben zu einem Stück darstellen. Die Rohrdosen bestehen aus einem Porzellansockel, in welchen die Klemmen eingekittet sind; letztere werden durch einen auf der Dose befindlichen Porzellandeckel vor Berührung geschützt.

Die Rohrdosen werden in zwei Modellen hergestellt, und zwar als runde Rohrdose von 55 mm Durchmesser und (einschliesslich Deckel) 30 mm Höhe (Fig. 293 a), geeignet zur Einführung von 1—4 Rohren von 11 mm lichter Weite. Je um 90° versetzt, sind am Umfange des Sockels vier Aussparungen angebracht, durch welche die Rohre eingeführt werden können. Diejenigen Aussparungen, welche nicht benutzt werden, sind durch Verschlussplatten aus Pressspahn abzuschliessen. Die Dose kann nicht allein

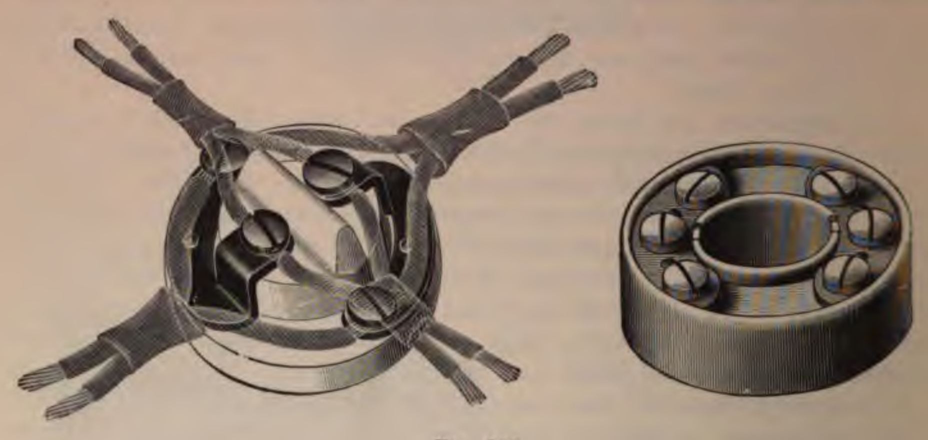


Fig. 292.

auf der Wand (Fig. 293 b), sondern auch in der Wand montiert werden (Fig. 293 c). Im ersteren Falle ist ein Stahldübel, Bleidübel mit Holzschraube oder eine einfache Holzschraube zu benutzen, wodurch Sockel und Deckel gleichzeitig gehalten werden; im zweiten Falle wird der Sockel eingemauert und der Deckel durch einen Deckelbolzen befestigt, wie aus Fig. 293 c zu ersehen ist.

Die zweite Art ist die viereckige Rohrdose 60 × 60 × 33 mm (Fig. 293 d), eingerichtet zur Einführung von 1 bis 4 × 2 Rohren von 11 mm lichter Weite.

Bei dieser Dose ist an jeder der vier Seiten eine Aussparung angebracht, durch welche zwei Rohre von 11 mm lichter Weite nebeneinander eingeführt werden können. Je nachdem nur ein Rohr von 11 oder 9 mm lichter Weite oder zwei Rohre von 9 mm lichter Weite eingeführt werden sollen, ist in die Aussparung eine Verschlussplatte mit entsprechenden Bohrungen einzusetzen; Aussparungen, durch welche kein Rohr eingeführt werden soll, werden durch Verschlussplatten ohne Bohrung abgeschlossen.

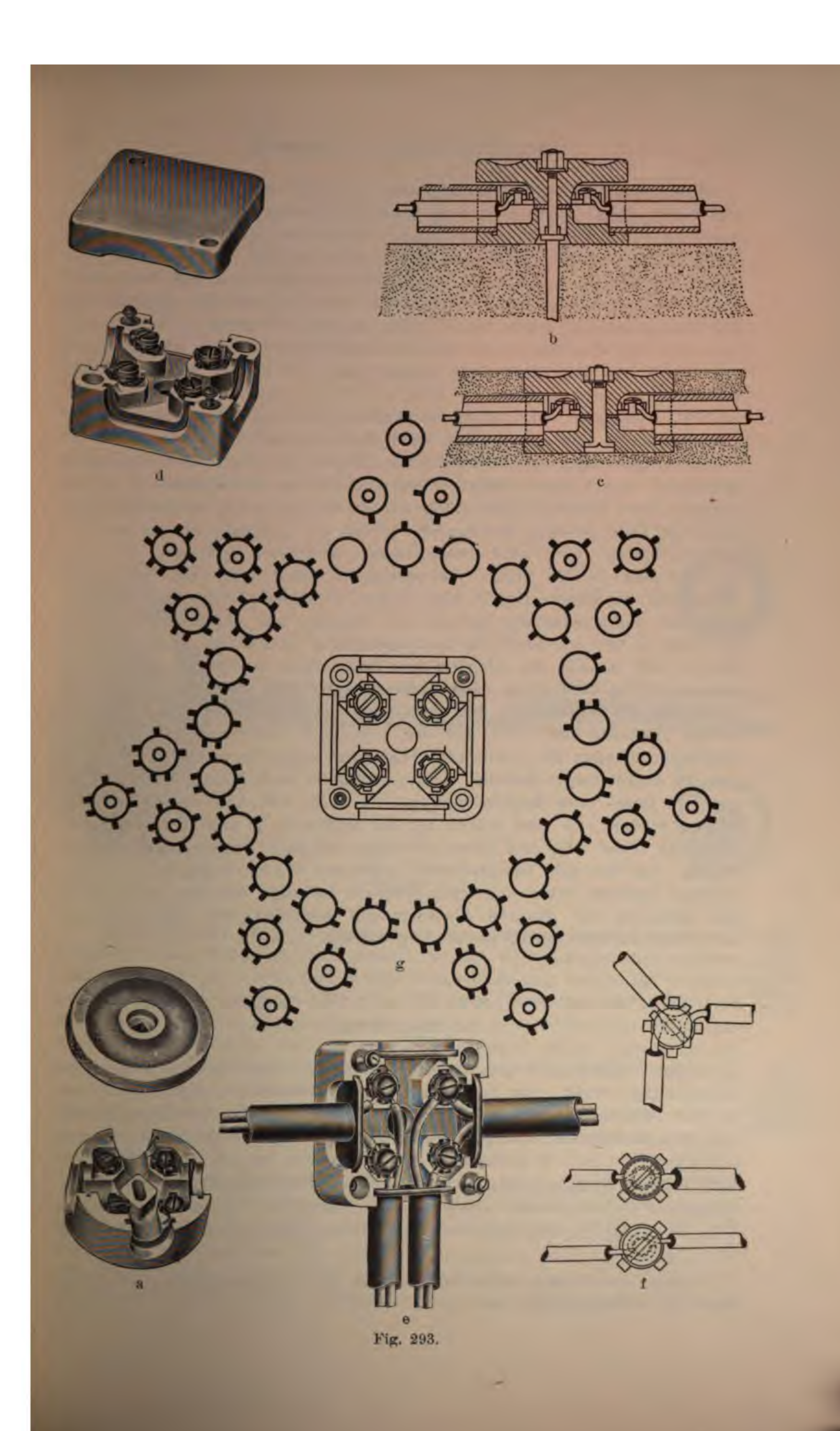


Fig. 293.

Fig. 293 e zeigt eine viereckige Rohrdose, in welche von unten zwei, rechts und links je ein Rohr von je 9 mm lichter Weite eingeführt sind; die Verschlussplatten sind mit entsprechenden Bohrungen versehen, die obere Aussparung ist durch eine Platte ohne Bohrung abgeschlossen. Der Boden des Sockels enthält eine runde Öffnung, die durch eine Deckplatte, welche entfernt werden kann, verschlossen ist; es kann dann ebenfalls ein Rohr von maximal 11 mm lichter Weite eingeführt werden, so dass diese Dose auch bei Wanddurchführungen zu benutzen ist. Ebenso wie die runde kann auch die viereckige Dose sowohl auf, wie in der Wand montiert werden.

Für Montagen auf der Wand werden die Rohrdosen elfenbeinartig glasiert, für die Montagen in der Wand unglasiert geliefert.

Die eigenartige Gestalt der Klemmen (Fig. 293 f) in diesen Rohrdosen ermöglicht ohne weiteres, mehrere Drähte durch eine Klemmschraube zu befestigen. Zwei Drähte gleicher Stärke können nebeneinander, solche ungleicher Stärke zu Ösen gebogen übereinander gelegt und festgeklemmt werden.

Die beiden vorstehend beschriebenen Rohrdosen gestatten die Ausführung aller in der Praxis vorkommenden Schaltungen (Fig. 293 g) mit einem und demselben Modell und einigen Verschlussplatten. Die Montage wird also ausserordentlich einfach und bequem, weil es nicht erforderlich ist, erst an Ort und Stelle die Leitungsführung überall im einzelnen festzulegen und danach die erforderlichen Dosen nach Zahl und Lage der Abzweigungen zu bestimmen. Der Monteur kann sich vielmehr an Ort und Stelle aus dem Sockel und den geeigneten Verschlussplatten, d. h. bei der runden Dose aus nur zwei, bei der viereckigen Dose aus nur fünf verschiedenen Stücken die gewünschte Dosenform selbst herstellen.

Die Sockel beider Modelle, welche unglasiert sind, können auch als Einlagen in Papp- oder Metallschutzdosen an Stelle von Abzweigscheiben verwendet werden. Es sind jedoch bei der letzteren, je nach der verlangten Schaltung, zwei oder drei Klemmschrauben an jeder Verbindungsstelle notwendig; bei den hier beschriebenen Rohrdosen werden dagegen, wie oben erwähnt, mehrere Drähte mit einer Schraube befestigt, und man kann daher mit denselben die gleichen Abzweigungen herstellen, wie mit zwei verschiedenen Ausführungen von Abzweigscheiben.

Die Verlegung von Leitungen in Rohre ohne isolierende Auskleidung.[1])

179. Die Zweckmässigkeit unausgekleideter Rohre.

Schon vielfach hat man isolierte Leitungen in Gasrohr ohne isolierende Auskleidung verlegt, nur hat man ein gut isoliertes Leitungsmaterial verwendet, indem man von der Anschauung ausging, dass bei einem Metallrohr mit isolierender Einlage der in das Rohr verlegte Draht durch seine Isolierung, die man in Anbetracht der isolierenden inneren Auskleidung des Rohres weniger gut wählt, nicht vor dem schädlichen Einfluss etwa eindringenden Kondenswassers geschützt wird. Dasselbe wird sich, wie sich aus Fig. 294 b ergiebt, zwischen der isolierenden Einlage *J* und dem weniger

1) Nach einer Arbeit, welche der inzwischen leider verstorbene PESCHEL dem Verfasser zur Verfügung gestellt hat.

gut isolierten Draht niederschlagen. Es ist infolgedessen bei der Verlegung der Rohre ohne isolierende Auskleidung Bedingung, den Draht selbst entsprechend besser zu isolieren, also die isolierende Einlage des Rohres wegzunehmen und auf den Draht selbst zu bringen (Fig. 294 c). Im ersteren Falle wird das Kondenswasser an irgend einer Stossstelle, hauptsächlich wenn dieselbe schlecht hergestellt ist (Fig. 294 a) Schluss zwischen dem Draht und dem Metallmantel *M* herstellen, da die Isolierung des Drahtes auf die Dauer gegen Feuchtigkeit nicht unempfindlich ist. Dagegen wird im zweiten Fall die Gefahr einer Verbindung zwischen dem Draht und dem Mantel des Rohres wesentlich geringer, da die Isolierhülle des ersteren von besserer Beschaffenheit ist, da man ausschliesslich Gummiaderdraht verwendet. Infolgedessen ist man bei diesem System auch unabhängig von der Zuverlässigkeit der Monteure, da es nunmehr auch nicht darauf ankommt, die Stossstellen so abzudichten, dass das Kondenswasser den Mantel nicht erreichen kann.

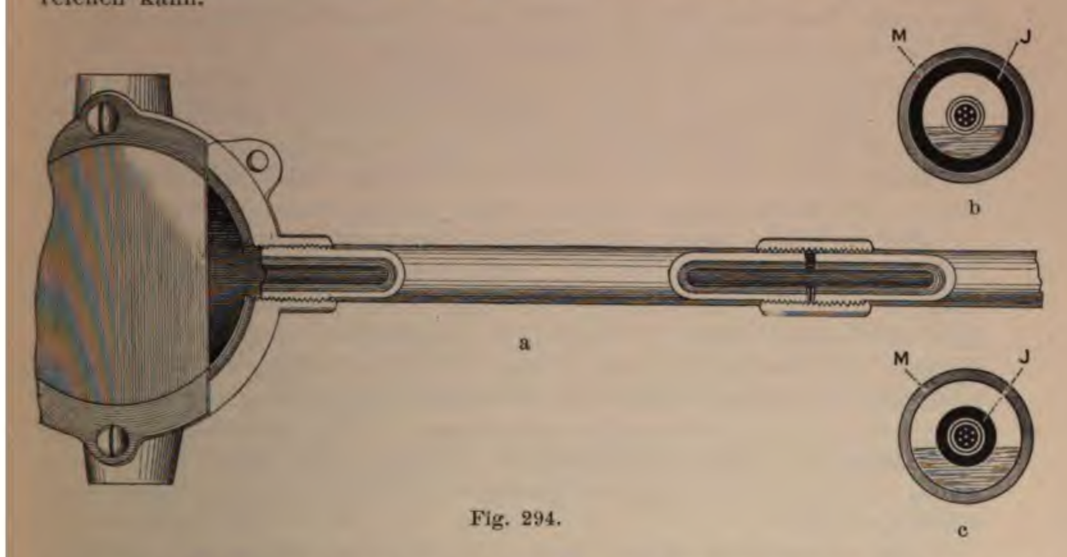


Fig. 294.

180. Stahlschlitzrohr und andere ähnliche Systeme.

Durch Peschel ist in Deutschland ein neues System eingeführt worden, Stahlrohre ohne isolierende Auskleidung, welche einen Längsschlitz besitzen und bei denen die Verbindungsstellen durch Federung hergestellt werden. Hierdurch wird eine gute elektrische Verbindung zwischen den Rohren erzielt, welche bei den übrigen Systemen, die durch Verschraubung verbunden werden, nicht besteht, und zwar weil bei diesen immer irgend welche Dichtungsmittel verwendet werden müssen, welche die leitende Verbindung mehr oder weniger aufheben.

Über dieses System, welches von den Siemens-Schuckert Werken in den Handel gebracht wird, berichtete Peschel im Elektrotechnischen Verein wie folgt:

„Durch die Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker ist für Hochspannungsleitungen vorgeschrieben, dass dieselben durch ein geerdetes Gehäuse geschützt sein sollen. Dieses geerdete Schutzgehäuse kann aber nur dann den Anforderungen entsprechen, wenn seine einzelnen Teile ihrer ganzen Länge nach ohne Unterbrechung unter sich elektrisch gut leitend verbunden sind. Infolge der Bedenken, welche von verschiedenen

Seiten hinsichtlich des Schutzwertes der Erdung aufgetaucht sind, ist von der Sicherheitskommission eine Spezialkommission eingesetzt worden, welche sich mit der Frage beschäftigen sollte, ob die Erdung so ausgeführt werden kann, dass sie für Menschenleben einen Schutz gewährt. Die Kommission bringt in ihrem Gutachten gelegentlich der Besprechung eines Dreileitersystems mit blankem Mittelleiter und 2 × 250 Volt folgenden Vorschlag:

Man kann auch einen guten Sicherheitszustand herstellen, indem man die äusseren Leiter mit kräftigen Metallumhüllungen versieht und diese sehr gut mit dem Mittelleiter verbindet oder als Teile desselben wirken lässt. Entsteht dann eine Berührung zwischen Aussenleiter und leitender Umgebung, so bilden dieselben sofort einen vollen Kurzschluss, dann ist aber die Sicherung auf diesen Kurzschluss gestellt."

Die Schwierigkeiten, diese Vorschriften auszuführen, waren bisher darin zu finden, dass man hierfür wirklich geeignetes Material auf dem Markt nicht erhalten konnte. Metallrohrsysteme als Schutzgehäuse sind vielfach verwandt. Man hat z. B. die elektrischen Leitungen in Gasrohre eingelegt und so vor mechanischer Beschädigung geschützt.

Gasrohr eignet sich schlecht zur Verlegung elektrischer Leitungen, da sich in demselben häufig Splitter befinden, welche beim Einziehen der Leitungen in die Isolation eindringen und dann zu Störungen aller Art Veranlassung geben. Diese entstehen nicht dadurch, dass die Leitungen in blanken Metallrohren liegen, sondern durch die losgelösten Splitter.

Eine englische Firma stellt deshalb Eisenrohre her, welche innen und aussen mit Emaille überzogen sind. Ausserdem werden in Frankreich, Dänemark und der Schweiz elektrische Leitungen, welche in oder auf dem Verputz verlegt sind, vielfach in Messingrohre eingezogen. England hat mehrere Systeme, bei denen glattwandige Metallrohre zur Herstellung von elektrischen Leitungen Verwendung finden. In Deutschland bedient man sich ausser des Gasrohres sehr viel starkwandiger Metallrohre, welche innen noch mit einer Isolierschicht aus Papier, Hartgummi u. s. w. überzogen sind. Leider sind jedoch diese Rohre zu teuer, so dass sie nur in den seltensten Fällen Verwendung finden.

Diese Rohrsysteme werden sämtlich wie Gas- und Dampfleitungen durch Schraubverbindungen zusammengesetzt. Sie würden sich daher ohne weiteres zur Herstellung eines geerdeten Schutzgehäuses eignen, wenn nicht die Schraubverbindungen vielfach als elektrisch nicht dicht zu bezeichnen wären, dass sie also einen nicht genügend guten elektrischen Kontakt geben, während nicht bestritten werden soll, dass unter gewissen Umständen mit Schrauben an sich sehr gute elektrische Kontakte hergestellt werden können.

Da die ganze Sicherheit eines geerdeten Schutzgehäuses für Hochspannungsleitungen ausschliesslich auf der sicheren Kontaktbildung der einzelnen Stücke untereinander beruht und das Rohrsystem in seiner ganzen Länge gut leitend sein muss, so sind die Schraubverbindungen in der jetzigen Ausführung nicht zu empfehlen. Jeder schlechte Kontakt bedeutet aber eine Gefahr, denn das Rohrsystem würde in diesem Falle nur ein falsches Gefühl der Sicherheit hervorrufen.

Die Herstellung guter Kontakte, unabhängig von der Zuverlässigkeit der Monteure, ist die Hauptaufgabe zur Lösung der Frage. Gelingt es, dafür eine Lösung zu finden, so kann das Rohrsystem nicht nur als Schutzrohrsystem für Hochspannung, sondern auch als geerdeter rohrförmiger Leiter

verwendet werden, welcher gleichzeitig als Schutz für die Isolierung des anderen Leiters dient. Damit ist aber eine neue Installationsmethode geschaffen, welche gegenüber den bisherigen Methoden nicht unwesentliche Vorteile aufweist. Man braucht dann nur noch einen isolierten Draht in das Metallrohr einzuziehen, während das Metallrohr als zweiter Leiter und Schutzgehäuse dient.

Dass das Verlegen von elektrischen Leitungen in blanke Metallrohre keine Gefahren bietet, ist längst bewiesen und bekannt, denn die Beleuchtungskörper sind sämtlich aus Metall hergestellt und nirgends im Innern isoliert.

Auch in Wohnräumen sind blanke, an Erde liegende Leitungen ganz ungefährlich. Blanke Leitungen, welche gegen andere Leitungen eine lebensgefährliche Spannung aufweisen, werden im gewöhnlichen Leben sehr oft, doch ohne die geringste Gefahr, berührt, so z. B. die Schienen von Trambahnleitungen.

Als ein weiteres Beispiel sei erwähnt, dass bei der Ferranti-Centrale in London, welche mit einer Spannung von über 10000 Volt arbeitet, der eine Pol als rohrförmiger Leiter den anderen Pol umschliesst und blank in die Erde verlegt ist. Es besteht also absolut keine Gefahr darin, in Wohnräumen Leitungen mit hoher Spannung, z. B. 2×220 Volt, einer Dreileiteranlage einzuführen, wenn die beiden Aussenleiter durch geerdete, gut leitende Metallschutzgehäuse vor gegenseitiger Berührung geschützt sind. In diesem Falle würde das Rohrsystem die Rolle des blanken Mittelleiters zu übernehmen haben.

Dass ein solcher blank verlegter Leiter keine Gefahr bietet, ergiebt einfaches Nachdenken. Praktisch ist dieses bewiesen, und zwar in Deutschland durch einzelne Elektrizitätswerke, wie z. B. das Stuttgarter Elektrizitätswerk, welches den blanken Mittelleiter bis zu den Beleuchtungskörpern weiterführt und so mit dem Glauben aufräumt, dass der blanke Mittelleiter entweder gar nicht in das Haus eingeführt oder höchstens bis zur Verteilungstafel weitergeführt werden darf.

Die Concentric Wiring Company in London hat ein Verlegungsmaterial ausgearbeitet, und zwar bis zur Lampenfassung hin, bei welchem ein Draht betriebsmässig geerdet ist. Der andere Draht ist mit einer guten Isolation versehen. Die Isolierung ist mit einer Drahtarmatur ausgerüstet und dient dieselbe gleichzeitig als blanker, betriebsmässig an Erde liegender Leiter.

Die Herstellung der Abzweigung ist mit ziemlichen Schwierigkeiten verbunden, da sie ungefähr ebenso ausgeführt werden muss wie eine Verlötung von Bleikabeln, und hat sich deshalb das System wohl auch noch nicht sehr eingebürgert.

Das nachstehend beschriebene neue Rohrsystem (Fig. 295) entspricht den verschiedenen Anforderungen nach Möglichkeit, indem es automatisch für eine gute Kontaktbildung sorgt, bequem und leicht für den Einbau ist und zu verhältnismässig billigen Preisen beschafft werden kann. An Stelle der Schraubenkontakte sind Federkontakte getreten. In eine Muffe wird ein Rohr eingeschoben, welches einen Längsschlitz aufweist und so hergestellt ist, dass das Rohr nach aussen auffedert. Durch das Einschieben des Rohres in eine Muffe oder ein Passstück wird das Rohr zusammengedrückt und der Längsschlitz mehr oder weniger geschlossen. Durch das mehr oder weniger tiefe Einschieben des Rohres, z. B. in eine Verbindungsmuffe, hat man es vollständig in der Gewalt, eine grössere oder kleinere Kontaktfläche herzustellen. Der Monteur hat in diesem Falle nichts zu thun, als glatte

Rohre auf richtige Länge abzuschneiden und in die nötigen Winkel- bezw. Passstücke einzuschieben. Ein Gewinde zu schneiden ist nicht nötig, da der Kontakt durch die Federung und nicht durch das Gewinde bewirkt werden soll. Wenn nun nicht nötig ist, Gewinde auf die Rohre zu schneiden, so können naturgemäss die Rohrwandstärken schwächer gewählt werden, als bei Rohren, auf welche ein Gewinde aufgeschnitten werden muss, denn das ganze Material, welches zum Anschneiden des Gewindes notwendig ist, kommt bei diesem neuen Rohrsystem in Wegfall. Dadurch wird dasselbe sehr viel leichter, deshalb auch in jeder Beziehung in der Verarbeitung bequemer. Da die Rohre in ihrem Längsschlitz nicht verlötet sind, sondern einen offenen Schlitz aufweisen, so sind solche Rohre natürlich auch billiger herzustellen als Rohre, die verlötet oder nahtlos gezogen sind. Den geschlossenen Rohren gegenüber sind die geschlitzten Rohre elektrisch gleichwertig, denn es wird in den Verbandsvorschriften überall vorgeschrieben, dass für eine Ventilation in den Rohren zu sorgen ist und dass die Rohre so zu verlegen sind, dass sich Wasser nicht dauernd darin ansammeln kann.

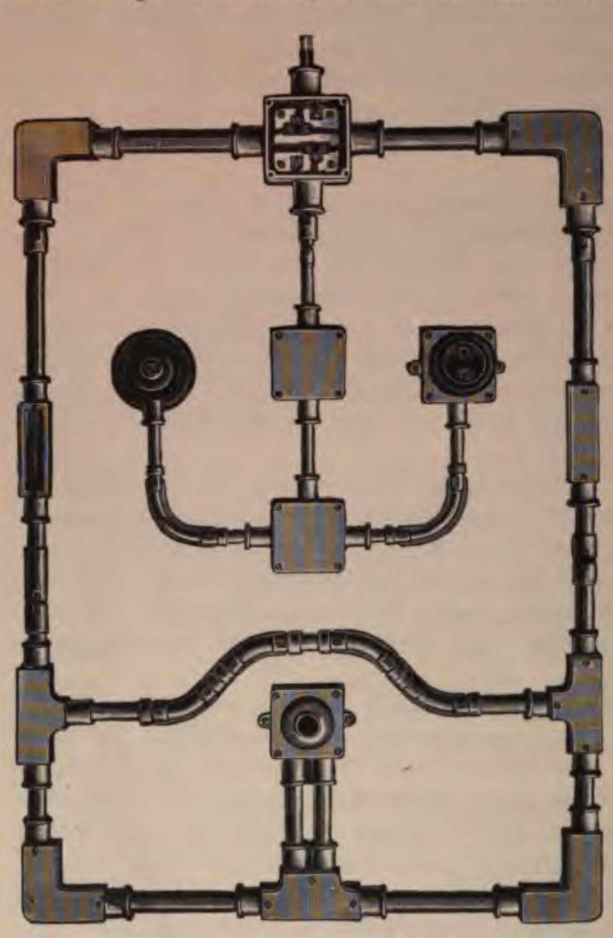


Fig. 295

Aus dieser Vorschrift geht hervor, dass bei den bisherigen Rohrsystemen die eingezogenen elektrischen Leitungen vor Feuchtigkeit nicht geschützt waren.

Werden die Rohre so verlegt, dass der Schlitz nach unten liegt, so wird stets das eventuell in dem Rohr auftretende Wasser abfliessen können.

Man glaubte ursprünglich, dass, wenn man Rohre mit offenem Schlitz zum Verlegen unter Putz verwendete, es vorkommen könne, dass beim Zuwerfen der Rohrkanäle Gips oder Mörtel durch den Schlitz in das Rohr eindringen könne, der beim Einziehen der Drähte hinderlich sei. Um jedoch auch diese Bedenken zu beseitigen, wurden von Peschel ursprünglich für die Rohre I-förmige Bleileisten geliefert, welche den Schlitz überdecken (Fig. 296), ohne dass dadurch die Federung der Rohre im Querschnitt verhindert wird. Indessen hat die Praxis



Fig. 296.

gezeigt, dass diese Bedenken absolut unbegründet sind. Selbst bei wenig sorgfältiger Arbeit kommt nur selten etwas Mörtel in das Rohr und fast stets nur so wenig, dass er beim Einziehen der Leitungen weggestossen wird.

Die Kontakte werden, wie bereits vorhin beschrieben, durch die Federung der Rohre bewirkt. Diese Kontakte sind sehr gut und vertragen, wie Versuche gezeigt haben, eine sehr bedeutende Belastung, ohne besondere Erwärmung zu zeigen.

Aus der folgenden Tabelle ist zu entnehmen, in welchen lichten Weiten die Stahlrohre ausgeführt werden, welchen Querschnitt und Widerstand sie besitzen und mit welchen Stromstärken sie dauernd belastet werden können.

Tabelle No. 13.

Lichte Weite	Querschnitt	Widerstand pro 1000 m bei 15° C.	Zulässige Strombelastung
8 mm	etwa 20 mm²	5·34 Ohm	15 Amp.
12 „	„ 30 „	4·34 „	18 „
16 „	„ 50 „	2·68 „	24 „
21 „	„ 70 „	1·71 „	30 „
26 „	„ 100 „	1·46 „	40 „

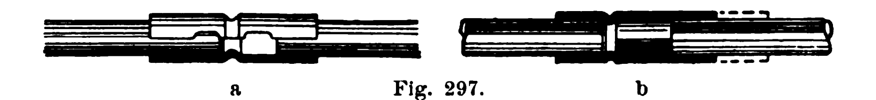
Bei Anwendung des Rohrsystems als geerdeter Leiter kann es im Zweileiterabzweig vorkommen, dass die weiterzuführende Strommenge so gross ist, dass die Wandstärke der Rohre keinen genügend grossen Querschnitt aufweist, dass also ein zu grosser Spannungsabfall eintreten würde, so dass man, um den Spannungsabfall zu vermeiden, die Rohrwandquerschnitte entsprechend verstärken müsste. Beides ist für die praktische Ausführung unzweckmässig und unbequem, denn man darf einerseits einen gewissen Spannungsverlust nicht überschreiten, andererseits würden aber dickwandige Rohre in der Montage sehr unbequem und auch sehr teuer werden.

Durch Beischalten eines blanken Drahtes, welcher entweder neben dem Rohr verlegt und an geeigneten Stellen mit dem Rohrsystem verbunden wird, oder durch Einziehen eines blanken Kupferdrahtes gemeinsam mit dem isolierten Leiter in das Rohr werden diese Fehler beseitigt. Ein solcher blanker Draht verteuert die Anlage nur ganz unwesentlich und beseitigt alle Bedenken.

Über das System selbst seien noch kurz einige Details gesagt. Die Rohre und Bogenstücke, Muffen, Kupplungsmuffen, Reduktionsmuffen u. s. w. sind aus beiderseitig verzinntem Stahlblech hergestellt. Die Verzinnung ist deshalb gewählt worden, um den Kontakt an den Stossstellen recht sicher und innig zu machen. Der Kontakt bleibt stets ein gleichmässig guter, da durch die Temperaturdifferenzen ein fortwährendes Verschieben der Kontaktflächen gegeneinander bedingt ist. Die Rohre werden in den lichten Weiten 8, 12, 16, 21 und 26 mm hergestellt. Diese Masse reichen im allgemeinen überall aus. Mit dem Rohr von 8 mm lichter Weite können im grossen ganzen die meisten Anschlüsse gemacht werden, bei denen es sich um einfache Zuleitung und Rückleitung handelt. In das Rohr wird dann nur ein Draht eingeschoben, und ist so der ganze Aufbau einer elektrischen Leitung ausserordentlich einfach und solid. Da, wo mehrere Drähte verwendet werden sollen, wird man eine grössere Rohrweite in Anwendung

bringen müssen. Die Rohrstücke werden untereinander mit gewöhnlichen Muffen verbunden, wie dieses ja bei Gas- und Wasserleitungen u. s. w. auch der Fall ist. Die Muffen (Fig. 297 a) haben in der Mitte eine Einschnürung und zwei Schaulöcher.

Die Einschnürung ist so tief gewählt, dass sie den Rohrrand des eingeschobenen Rohres überdeckt und gleichzeitig ein zu tiefes Einschieben desselben von der einen Seite verhindert. Die Muffen sind so lang, dass ein guter, zuverlässiger Kontakt gebildet wird. Zur Beobachtung einer richtig ausgeführten Verbindungsstelle sind die Schaulöcher von grossem Vorteil, denn man sieht durch dieselben, ob die Rohre vorschriftsmässig tief eingeführt sind oder nicht. Zur Verbindung von zwei Rohrenden, deren eines



a Fig. 297. b

Ende festgelegt ist, dient die sogenannte Kupplungsmuffe (Fig. 297 b) und diese hat denselben Zweck wie die ähnliche Konstruktion bei Gas-, Wasser- oder Dampfrohren. Im Gegensatz zu der gewöhnlichen Muffe ist bei der Kupplungsmuffe der eine Muffenteil so lang ausgebildet, dass es möglich ist, die Muffe über das eine Rohr so weit zurückzuschieben, bis das andere Rohr am anderen Ende der Muffe eingeführt werden kann. Die Verwendung der Kupplungsmuffen ist besonders da zu empfehlen, wo die Rohre von zwei Seiten aus verlegt werden. Man ist dadurch imstande, jederzeit einzelne Leitungen, sowie Teile des Rohrnetzes auszuwechseln, so dass den Sicherheitsvorschriften genügt wird.

Die Reduktionsmuffen (Fig. 298) gestatten eine Verwehdung von Rohren geringeren Durchmessers mit Rohren oder Passstücken von grösserem Durch-

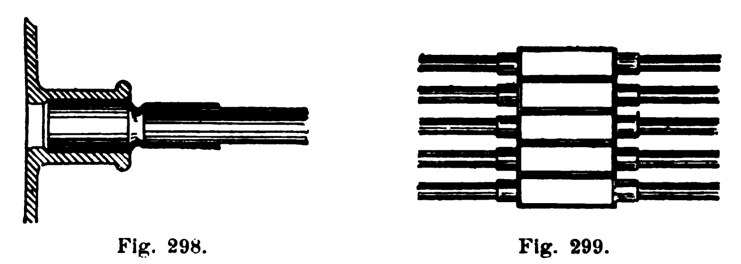


Fig. 298. Fig. 299.

messer und sind in der Weise ausgeführt, dass die eine Hälfte der Muffe zum Einschieben und die andere Hälfte zum Überschieben über den nächstkleineren Rohrdurchmesser geeignet ist. So würde sich z. B. eine Reduktionsmuffe von 28 auf 23 mit dem grösseren Teil in eine Bohrung für 28er-Rohr einschieben lassen, während in den kleineren Teil das 23er-Rohr eingeschoben werden könnte. Auch hier sind solche Einschnürungen angebracht, so dass vorstehende Rohrkanten schädliche Einwirkungen nicht ausüben können.

Bei sehr langen geraden Leitungen, sowie kurz vor einer Anzahl von Krümmungen ist es erwünscht, den Draht nochmals zugänglich zu machen, ohne dass man gezwungen ist, eine grosse Dose einzusetzen. Für diese Zwecke dienen sogenannte Zwischenkasten, die nur wenig breiter als die Rohre sind.

Soll eine Anzahl Rohre nebeneinander verlegt werden, so sind die Zwischenkasten entweder wie in Fig. 299 anzuordnen oder gegeneinander zu versetzen, so dass die Rohre entsprechend näher aneinander gelegt werden können. Es ist zweckmässiger, für jedes Rohr einen besonderen Kasten zu verwenden, als Kästen mit mehreren Rohrstutzen in Anwendung zu bringen, da solche Modelle selten auf dem Arbeitsplatz sind. Ausserdem ist es unbedingt notwendig und wünschenswert, dass sich die isolierten Leiter gegenseitig nicht berühren, da sonst unter Umständen zwischen den Aussenleitern einer Dreileiteranlage direkt Kurzschluss entstehen könnte. Es werden deshalb für gerade und winklige Weiterleitungen von Rohrbündeln Kasten mit mehreren Rohrdurchführungen nicht hergestellt.

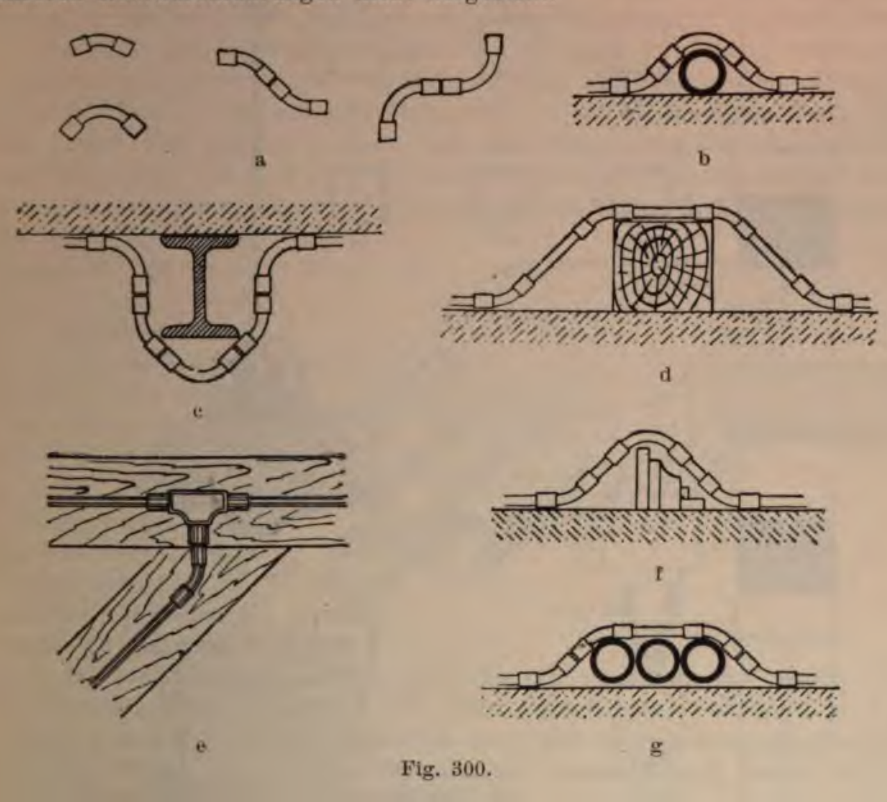


Fig. 300.

Die Fig. 300 zeigt Bogenstücke resp. Halbbogenstücke in verschiedener Zusammenstellung.

Für gewöhnliche Rohrführungen im rechten Winkel dienen Bogenstücke, für grössere Winkel sogenannte Halbbogenstücke, deren Muffen anderthalb rechte Winkel in sich einschliessen. Beide werden aus zwei Blechschalen hergestellt, welche durch Spannringe aufeinander gepresst werden. An den Enden für die Rohreinführung haben die Stücke eine muffenartige Erweiterung, welche ebenso wie bei den Muffen die scharfen Kanten des Rohres überdecken. Die Halbbogenstücke sind ein ganz hervorragend bequemes und gutes Material zur Verlegung der Rohre. Durch die Kombination dieser Halbbogenstücke mit kürzeren oder längeren zwischen dieselben eingesetzten geraden Stücken ist man imstande, alle die bei der Montage der Leitungen vorkommenden Überbrückungen und Abbiegungen der Rohre u. s. w. aus-

zuführen (Fig. 300 c — g) und man kann durch das grössere oder kleinere Zwischenstück die Rohranordnung so treffen, dass dem nachträglichen Durchziehen von Leitungsdrähten der geringste mechanische Widerstand entgegengesetzt wird.

Um in einfacher Weise mehrere Bogen mit demselben Konstruktionsteil ausführen zu können, haben Hartmann & Braun A.-G. biegsame Rohrkupplungen vorgeschlagen, die aus geflochtenem oder geklöppeltem Drahtschlauch

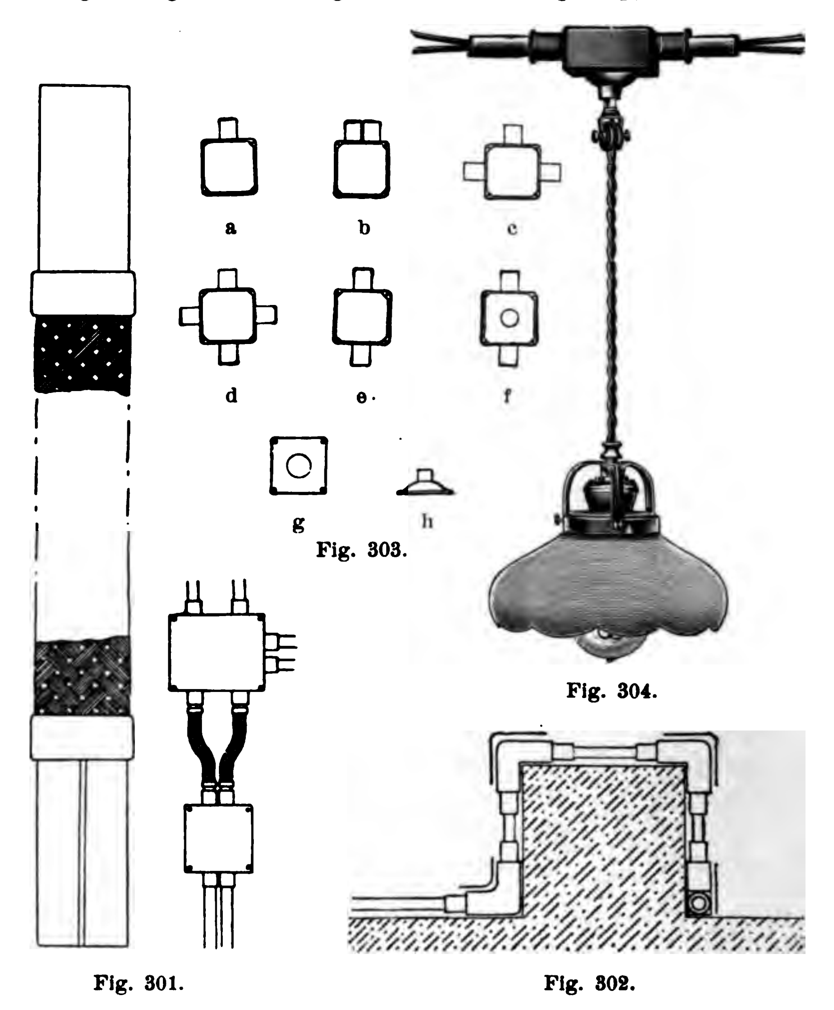


Fig. 303.

Fig. 304.

Fig. 301.

Fig. 302.

(Fig. 301) bestehen, an dessen Enden Rohrstücke zur Verbindung mit Abzweigkasten, Muffen u. s. w. befestigt sind. Die Siemens-Schuckert Werke verwenden für den gleichen Zweck Pforzheimer Metallschlauch. Im übrigen ist es Hartmann & Braun A.-G. gelungen, eine Vorrichtung zu konstruieren, welche das geschlitzte Stahlrohr in bequemer Weise zu biegen gestattet.

Für die Umgehung von rechten Winkeln sind Winkelkasten vorhanden, bei welchen der Winkel innen, aussen und oben durch einen Deckel abgeschlossen ist (Fig. 302). Bei allen Kasten ist darauf Bedacht genommen, dass zum Arbeiten und zum Einziehen der Leitungsdrähte den Leitungsquerschnitten entsprechend ein genügend grosser Raum vorhanden ist.

Zur Unterbringung der üblichen Abzweigvorrichtungen und zur Ausführung der nötigen Anschlüsse dienen Dosen, wie dieses ja auch bei anderen Rohrsystemen der Fall ist (Fig. 303 a bis f). Die Dosen können gleichzeitig auch zur Befestigung von Ausschaltern, Steckkontakten u. s. w. Verwendung finden und sind die Deckel mit einer entsprechenden Ausbohrung zur Durchführung der Drähte versehen (Fig. 303 g). Ebenso sind Deckel vorhanden, welche das Anschrauben von Deckenpendeln und Wandarmen gestatten (Fig. 303 h u. 304).

Sollten von den Gussdosen aus Leitungen durch die Wand geführt werden, so ist der Boden der Dose zu durchbohren und auf den Boden ein Rohrdübel (Fig. 311) aufzuschrauben. Soll auf eine Dose ein Schalter aufgesetzt werden, so ist der Deckel der Dose gegen einen Schalterdeckel auszutauschen.

Um nun dem Monteur auch Mittel an die Hand zu geben, welche ihm gestatten, andere als die in Fig. 303 gezeigten Dosenformen zu verwenden, haben die Siemens-Schuckert Werke eine Universaldose konstruiert. Dieselbe bietet den grossen Vorteil, dass aus wenigen Stücken eine Dose mit einer beliebigen Zahl und Auswahl von Anschlüssen hergestellt werden kann. Sie ist aus verzinntem Eisenblech angefertigt und besitzt in den Seitenwänden oder auch im Boden Öffnungen, vor denen nach Bedarf Stutzen oder Verschlussbleche für ein oder zwei Rohre von 8, 12 oder 16 mm lichter Weite befestigt werden können. Die Art der Zusammenstellung geht aus Fig. 305 hervor. Die Stutzen werden verwendet, wenn das Rohrsystem als Stromleiter dient, die Verschlussbleche, wenn das Rohr nur als Schutzrohr benutzt wird. Die Verschlussbleche und die Flanschen der Stutzen besitzen je zwei Schrauben zur Befestigung; dieselben sind nur so weit herauszuschrauben, dass die Bleche von aussen her in die Dosenwandung durch seitliche Neigung oder Drehung eingehakt werden können, zu welchem Zwecke Schlitze und Löcher nach Art der Bajonettverschlüsse in den Blechwandungen vorgesehen sind. Durch Anziehen der Schrauben von der Innenseite der Dose aus wird das Blech befestigt. Die nicht benutzten Öffnungen werden durch Verschlussbleche ohne Öffnungen abgedeckt. Die aus diesen herausstehenden Splinte werden nach dem Einsetzen in die abzuschliessende Dosenöffnung nach vorn umgebogen. Es ist dabei zu beachten, dass der Splint stets um die vordere Kante der zugehörigen Aussparung der Dose umgebogen wird. Der Deckel ist in die Dose eingesprengt, es sind also keine Schrauben zu seiner Befestigung verwendet; er ist so gestaltet, dass er bei in der Wand montierten Dosen herausgenommen werden kann, ohne dass die Wand beschädigt wird. Damit er sich der Wand gut anpasst, ist seine Oberfläche eben gehalten. Die flache Form der Dose erleichtert die Montage der Leitungen in ihrem Innern.

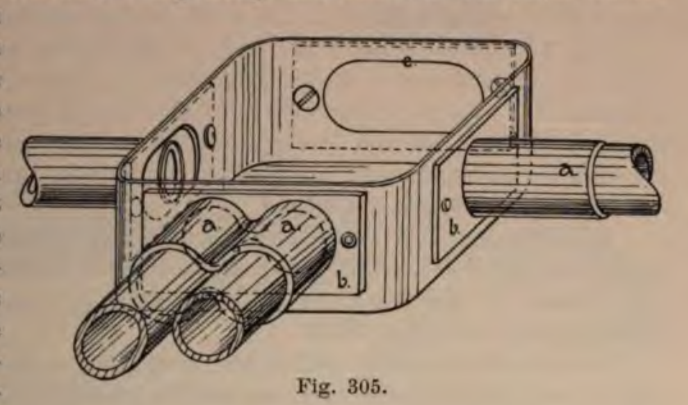


Fig. 305.

In Fig. 306 ist die Anwendung von Universal-Abzweigdosen zur Schaltung von zwei Lampengruppen mit Umschalter veranschaulicht. In Fig. 306a dienen die Rohre den Leitungen nur als Schutz; sie sind durch Verschlussbleche hindurch in die Dose geführt. In Fig. 306b dienen die seitlichen und oberen Rohre, die durch Stutzen mit der Dose verbunden sind, als Stromleiter; parallel geschaltete Kupferdrähte sind durch grossköpfige Schrauben mit der Dose verbunden.

Sollen die Leitungen durch Decken geführt werden, so ist es zweckmässig, dieselben, wie z. B. in Fig. 307 dargestellt, durch ein übergeschobenes Gasrohr zu schützen, damit Aufwaschwasser in die Rohre nicht eindringen kann.

Sehr häufig kommen bei Montagen Stellen vor, die eine besondere Biegung des Rohres wünschenswert erscheinen lassen, die Schlitzrohre können jedoch nur nach einer Seite hin gut gebogen werden. Dies reicht in der Praxis nicht aus. Es werden deshalb dem Material nahtlose Rohre beigegeben. Die Rohrstücke sind oben und unten so weit aufgetrieben, dass sie eine Muffe bilden, in welche das Federrohr direkt eingeschoben werden kann (Fig. 308).

Diese Rohre sind weich und können ohne besondere Schwierigkeiten nach Bedarf gebogen werden, wie z. B. in Fig. 309 (im übrigen siehe S. 278).

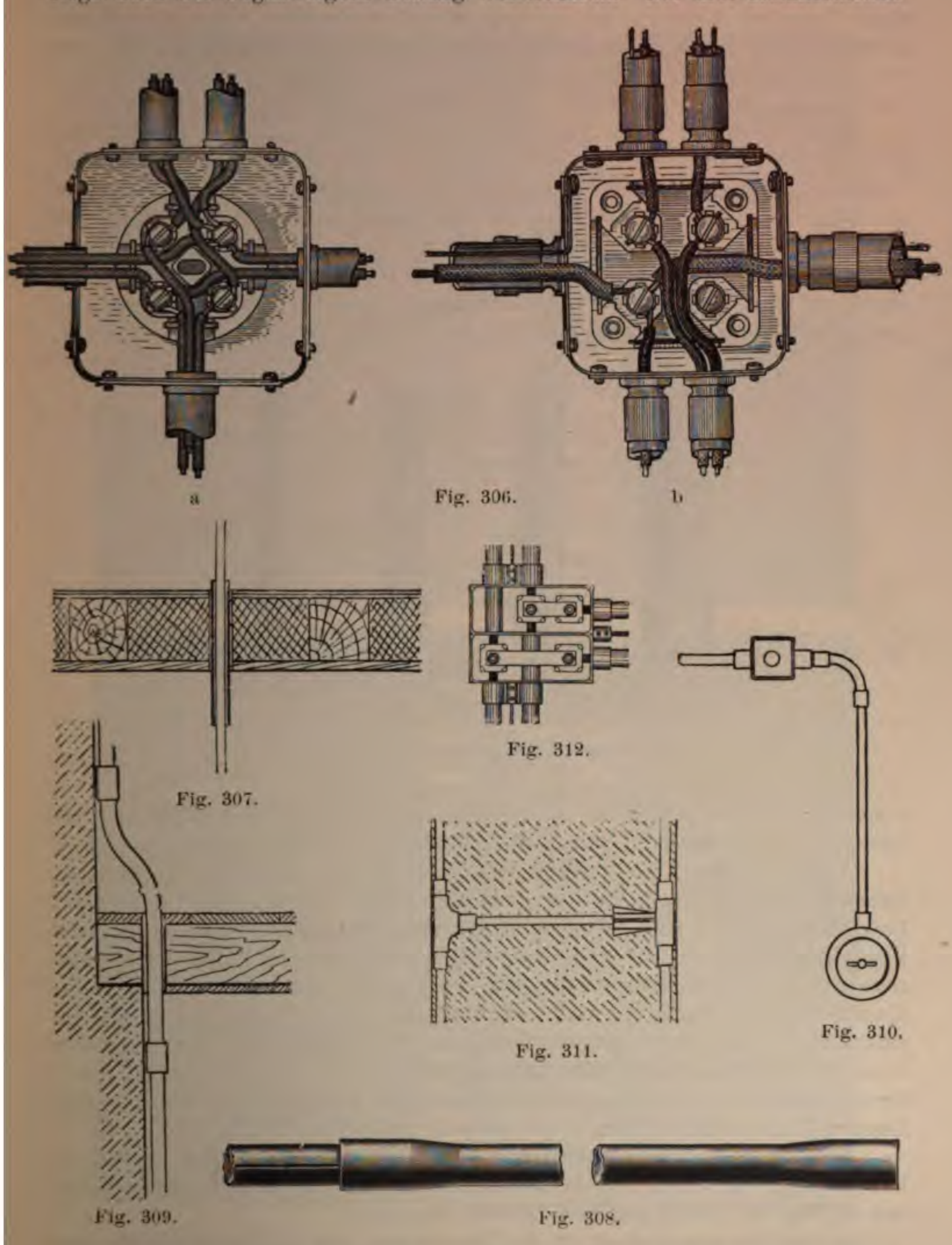
Fig. 310 zeigt einen Fall, der in der Praxis sehr häufig vorkommt. Durch die Wände treten die Leitungen in eine Dose und werden nach dem Ausschalter und dem Lüster weitergeführt. Da es zweckmässig ist, so wenig wie möglich Modelle von Dosen am Arbeitsplatze zu haben, hat man die Winkeldosen weggelassen. Die oben beschriebene Aufgabe wäre also, wie im Schema angedeutet, zu lösen.

Fig. 311 zeigt die Ausführung einer Mauerdurchführung, wobei auf der einen Seite eine Dose für einen Ausschalter verwendet ist, welche mittels eines Dübels in der Wand festsitzt, während auf der anderen Seite nur ein T-Stück zum Anschluss dient.

Für die Abzweigung von Doppelleitungen, sowie auch für die Abzweigung von Einzelleitungen sind die nötigen Passstücke vorhanden. Auf einen Kasten für die Abzweigung einer Hauptleitung von 2×220 Volt und mehr sei besonders hingewiesen (Fig. 312). Der Kasten besteht aus Gusseisen und ist in seinem Innern in zwei Zellen eingeteilt. Die beiden Hauptleitungen führen an der einen Seite durch den Kasten, und zwar liegt dabei die eine Leitung in der einen Zelle offen, während die andere durch einen angegossenen Schutzdeckel von der Zelle abgetrennt ist. Eine direkte Berührung der beiden Aussenleiter untereinander ist also ausgeschlossen. Im Gegensatz zu den sonst üblichen Abzweigvorrichtungen soll ein Ablöten der abgezweigten Leitungen verhindert, ebenso die abgezweigte Leitung nicht mittels eines aufgelöteten Kabelschuhes angeschlossen werden. Zu diesem Zweck sind sowohl Hauptleitung wie abgezweigte Leitung mit einer sogenannten Verbindungsklemme (VK) der SIEMENS-SCHUCKERT Werke ausgerüstet und untereinander durch einen gewellten Metallstreifen verbunden. Diese scheinbar teuere Anordnung bietet sowohl elektrisch als auch in der Montage so viel Vorteile, dass sie in der That bedeutend besser und billiger auszuführen ist als eine gewöhnliche Lötverbindung.

Will man diese Abzweigkasten nicht verwenden oder hat man Drehstromanlagen, so empfiehlt es sich, Hauptabzweigungen zu verwenden, wie sie von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in den Handel gebracht

werden, dadurch charakterisiert, dass in die Steigleitungen drei Kupferschienen oder drei Metallschienen eingeschaltet werden, von denen aus Querstege nach der abgezweigten Leitung weiterführen. Die drei Metallschienen



a Fig. 306. b

Fig. 307.

Fig. 312.

Fig. 311.

Fig. 310.

Fig. 309.

Fig. 308.

dienen dabei zum Anschluss und zur Abzweigung der drei Drähte bei Drehstromanlagen oder zum Anschluss der beiden Aussenleiter eines Dreileitersystems und zum Anschluss des blanken Mittelleiters.

Bei Gleichstromanlagen kann das Rohrsystem, wenn ein Leiter betriebsmässig an Erde liegt, als geerdeter Leiter Verwendung finden. In diesem Falle ist darauf zu achten, dass die Rohre untereinander und mit dem an Erde liegenden Leiter elektrisch gut leitend verbunden sind. Zu diesem Zweck dienen kleine Gussmuffen (Rohrverbinder) mit Ansatz, welche über die Rohre geschoben werden und unter sich und mit dem blanken Leiter durch einen durchgeschobenen Draht verbunden werden können (Fig. 313).

Es sei noch auf die Art des Rohranschlusses an Apparate, insbesondere Sicherungen hingewiesen. Da man für diese viele voneinander abweichende Abmessungen hat, so würde zum Anschluss desselben eine Unzahl von Konstruktionen erforderlich sein. Diesem Übelstand ist durch nachfolgend beschriebene Anordnung abgeholfen.

Statt der einfachen Rohrverbinder, wie sie in Fig. 313 veranschaulicht sind, werden Einfach- und Doppelrohrstutzen verwendet, die auf besondere, den verschiedenen Sicherungsmodellen angepasste Blechkästchen (Fig. 314)



Fig. 313.

aufgesetzt werden, und zwar nach erfolgtem Anschluss der Leitungen. Der Anschluss von Rohren an Schalter ist bereits an anderer Stelle[1]) behandelt.

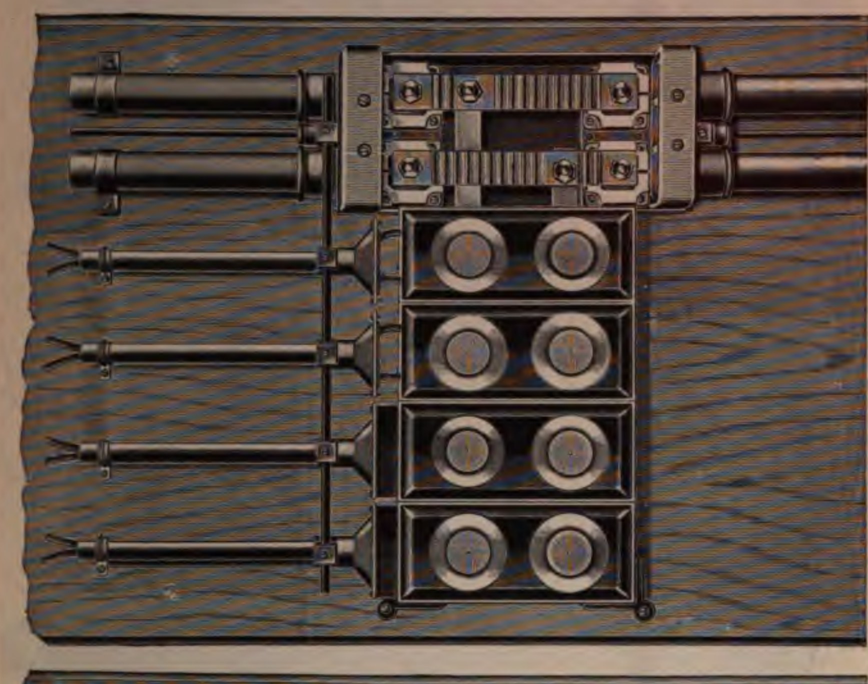
Ausser diesen Anordnungen kommt noch ein Modell in Anwendung, welches auch für die schmalsten Sicherungselemente ausreicht (Fig. 315). Das Schutzkästchen wird dabei so über den Rohrstutzen gesteckt, dass dessen Flansch in dem Kästchen liegt. Durch die beiden Schrauben an der Aussenseite des Flansches, welche nur gelöst zu werden brauchen, kann dann das Kästchen am Flansch festgeklemmt werden. Die Kästchen selbst werden entsprechend den Abmessungen des Sicherungssockels und der Lage der Drahteinführung aus einer Blechtafel dadurch hergestellt, dass die in Fig. 316 durch punktierte Linien angedeuteten Quadrate ausgeschnitten und die drei Lappen umgebogen werden.

Wo nur zwei Rohre miteinander zu verbinden sind, wird die Federklemme Fig. 317, und wo ein Drahtanschluss an ein Rohr herzustellen ist, das in Fig. 318 wiedergegebene Modell verwendet.

In den meisten Fällen ist die Wandstärke der Rohre vollständig zur Weiterführung der abgezweigten Stromkreise ausreichend, die ja selten mit

1) Hdb. VI, 1. S. 225.

ıehr als 6 Amp. belastet sind. Wird in einem speziellen Fall eine hohe tromstärke verlangt, so kann man zu dem Rohr einen Kupferdraht parallel chalten, welcher entweder neben das Rohr gekrampt oder gleichzeitig mit



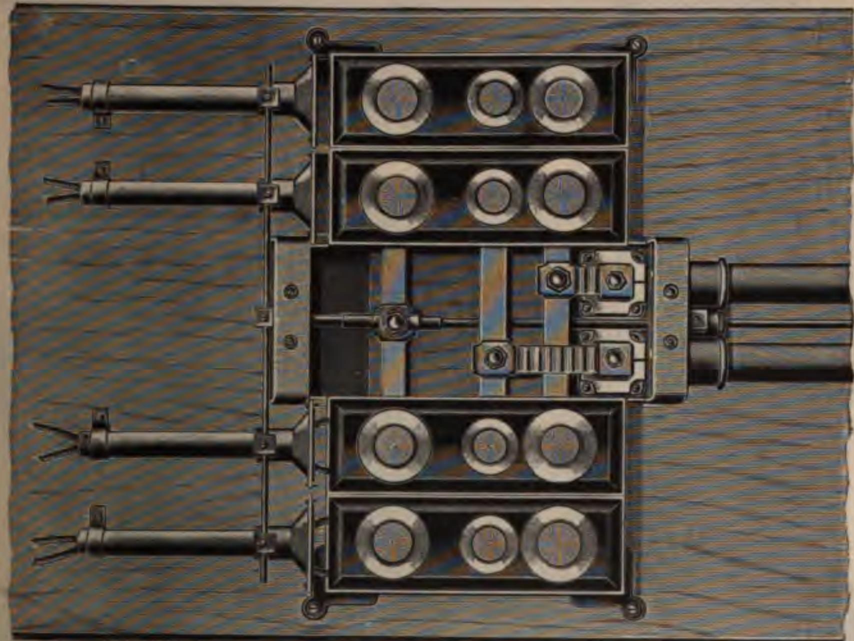


Fig. 314.

lem isolierten Draht eingezogen wird. Der Kupferdraht wirkt dann in aralleler Schaltung mit dem Rohrsystem.

In vielen Fällen wird es sich empfehlen, die Montage, z. B. Anschlüsse nehrerer Wandarme oder Steckkontakte, so auszuführen, dass unter dem

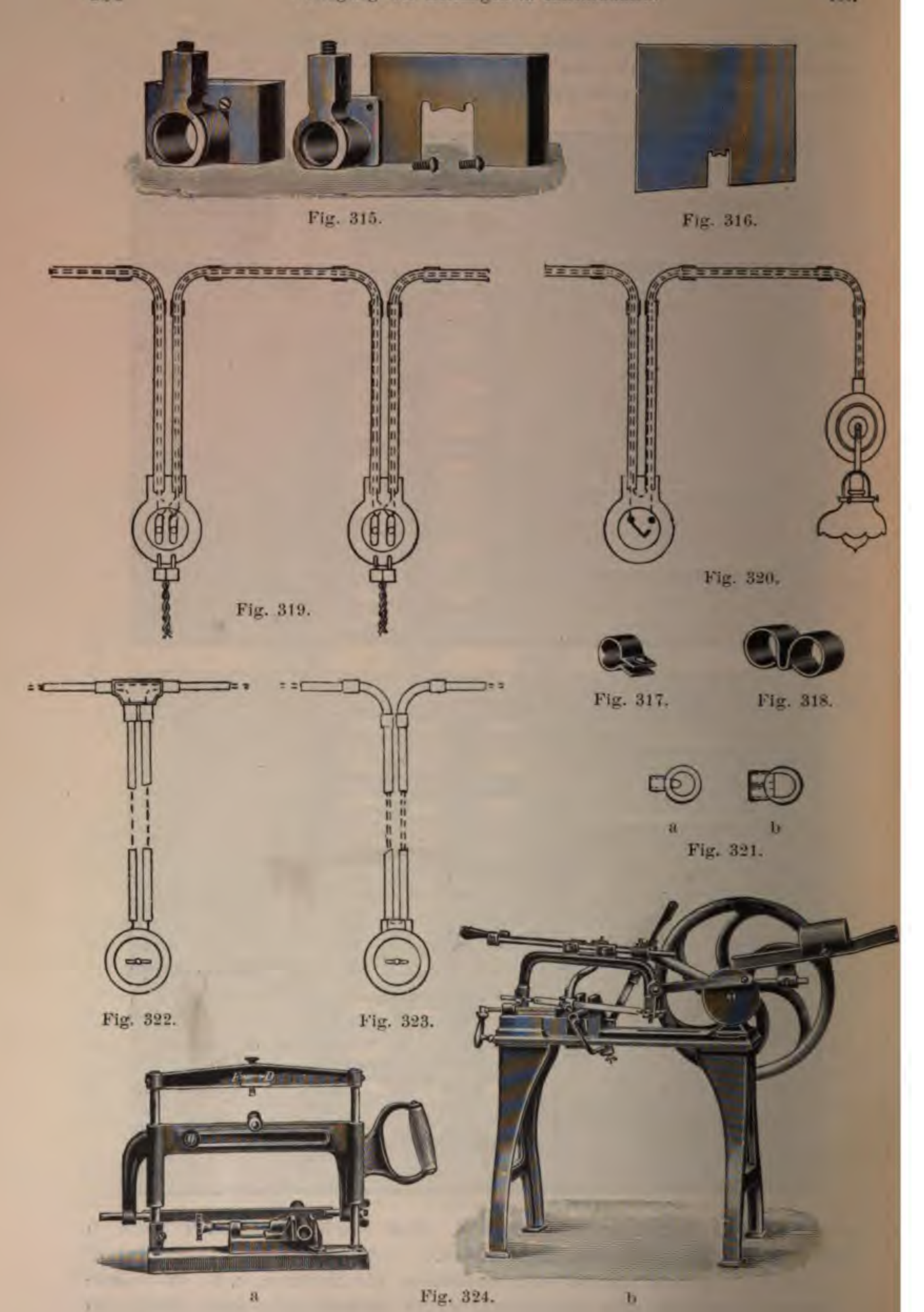


Fig. 315. Fig. 316.

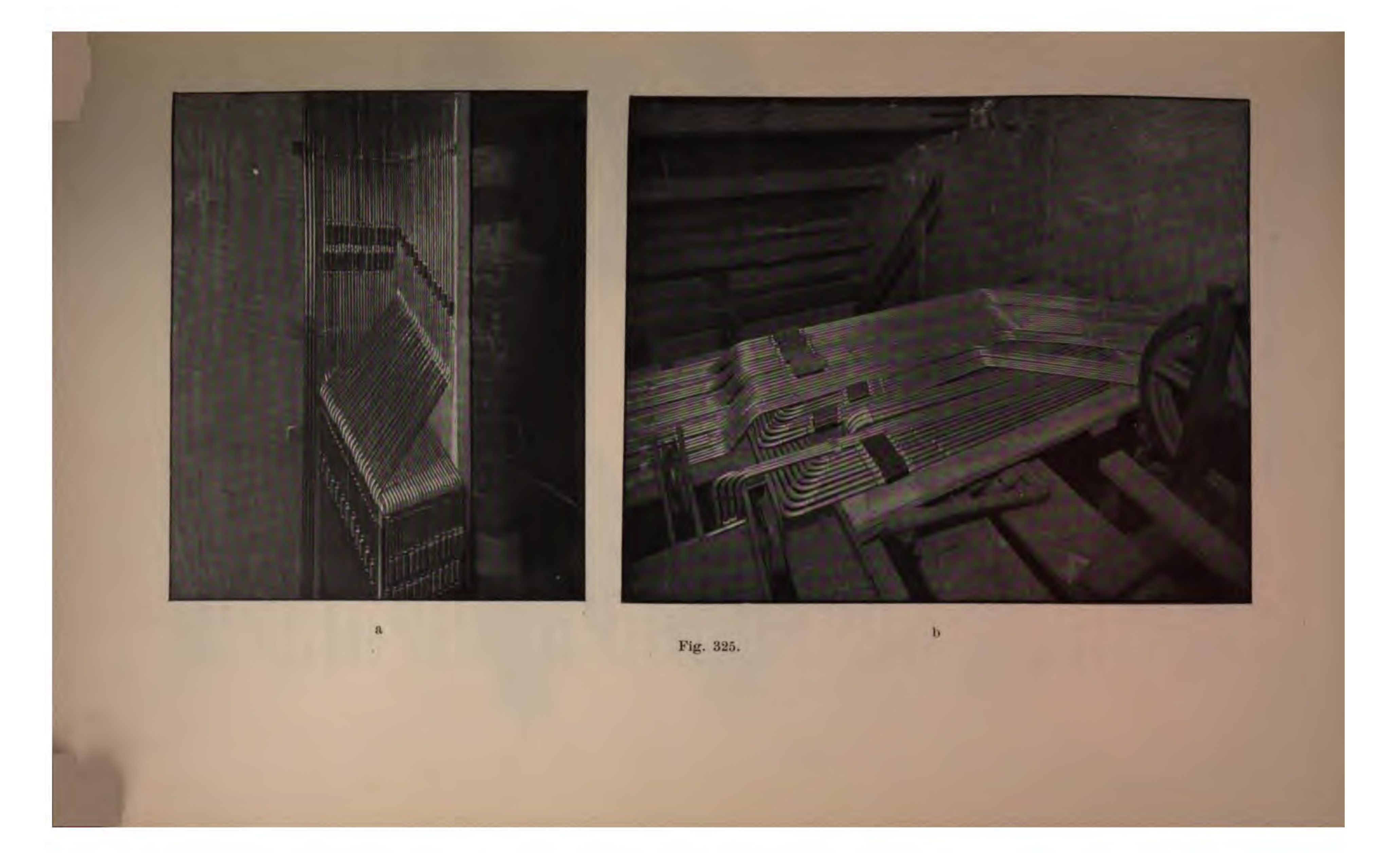
Fig. 319. Fig. 320.

Fig. 317. Fig. 318.

Fig. 321.

Fig. 322. Fig. 323.

Fig. 324.



a

b

Fig. 325.

Steckkontakt oder Wandarm die Abzweigdose angebracht ist und nicht mehr oben an der Decke, wie es bisher üblich war. Die einzelnen Anschlüsse wären dann durch U-förmige Stücke untereinander zu verbinden (Fig. 319).

Eine derartige Anordnung ist ausserordentlich bequem und leicht kontrollierbar. Es können dabei auch Schalter für die einzelnen Lampen eingesetzt werden, wie dieses z. B. in Fig. 320 schematisch angedeutet ist.

Soll bei dieser Anordnung das Rohrsystem gleichzeitig als betriebsmässig geerdeter Leiter oder als geerdete Schutzverbindung dienen, so muss an den Rohrenden, welche zum Schalter oder Wandarm führen, eine Verbindung der beiden Rohre angebracht werden; das wird am bequemsten entweder durch eine Dose (Fig. 303 b) oder ein Schalteranschlussstück (Fig. 321 b) mit zwei Rohrstutzen ausgeführt, während zum Anschluss von Steckkontakten u. s. w. ein Schalteranschlussstück mit einem Rohrstutzen genügt (Fig. 321 a).

Will man bei Verlegung auf den Verputz Ausschalter mit Porzellanfuss verwenden, welche zum Einschieben der Rohre bereits Porzellanhülsen besitzen, so ist die Abzweigung nach Fig. 322 mit einem Doppel-**T**-Stück auszuführen und kann dann die Verbindung der Rohre unten am Ausschalter in Wegfall kommen.

Werden zur Herunterführung der Leitungen an den Ausschalter statt des **T**-Stückes, wie in Fig. 322, Bogenstücke verwendet (Fig. 323), so müssen die Rohre bei dem Ausschalter elektrisch leitend verbunden werden, sei es durch einen Metallfuss des Ausschalters oder durch sonst eine besondere Vorrichtung (s. Fig. 313).

Zum Abschneiden der Rohre kann man gewöhnliche Handsägen, Feilen oder die in Fig. 324 abgebildeten kleinen oder grossen Sägemaschinen in Anwendung bringen, letztere hauptsächlich in dem Fall, wo sehr grosse Mengen von Stahlrohr verlegt werden sollen. Der Grat wird mit einem Schaber oder Fraiser weggenommen; an den Austrittsstellen der Leitungen werden kleine Metalltüllen eingesetzt, um einer Beschädigung der Leitungen vorzubeugen.

Die Bedenken, welche ursprünglich gegen die weitgehende Einführung dieses Systems geltend gemacht wurden, sind längst behoben und es existieren bereits Anlagen, in denen mehr als 30 km Rohr verlegt sind. Als Beispiel einer ausgeführten Anlage seien die beiden Fig. 325 a u. b wiedergegeben, welche die Leitungsführung im „Grossen Theater“ in Rotterdam zeigen, und zwar Fig. 325 a die Steigleitungen vom Bühnenregulator nach den Soffitten — 24 Rohre für die verschiedenen Farben, 24 Rohre für Bogenlampenleitungen, 3 Rohre für die Rückleitung. Fig. 325 b zeigt einen Teil des Schnürbodens mit den gleichen Rohren.

Überhaupt besteht allgemein grosse Neigung, dieses Stahlrohrsystem wegen seiner Sicherheit für Theater in Anwendung zu bringen. In kurzer Zeit wurden die Theater in Rotterdam, Nationaltheater Berlin, Hoftheater Frankfurt, Hoftheater Darmstadt, Karltheater Nürnberg und Colmar damit ausgerüstet.

Das Rohrsystem der Simplex-Steel Conduit Co.

Nach dem System der Simplex-Steel Conduit Co. werden elektrische Leitungen ebenfalls nicht in Isolierrohre, sondern in Metallrohre verlegt, welche aus Stahlblechstreifen hergestellt werden. Dieselben sind zusammen-

gerollt, so dass die beiden Kanten des Streifens dicht voreinander liegen und gegeneinander federn, werden dann innen und aussen mit einem Emailleüberzug versehen und bilden so ein Isolierrohr, welches gleichzeitig durch den Überzug gegen Rost geschützt und dessen Schlitz verschlossen ist. Die einzelnen Rohre werden dann mit dazugehörigen Passstücken einfach ineinandergeschoben und durch die Emaille abgedichtet.

Vor dem Emaillieren können die Stossenden auch noch verlötet werden, wenn eine besonders gute Abdichtung erforderlich sein sollte. Ferner werden

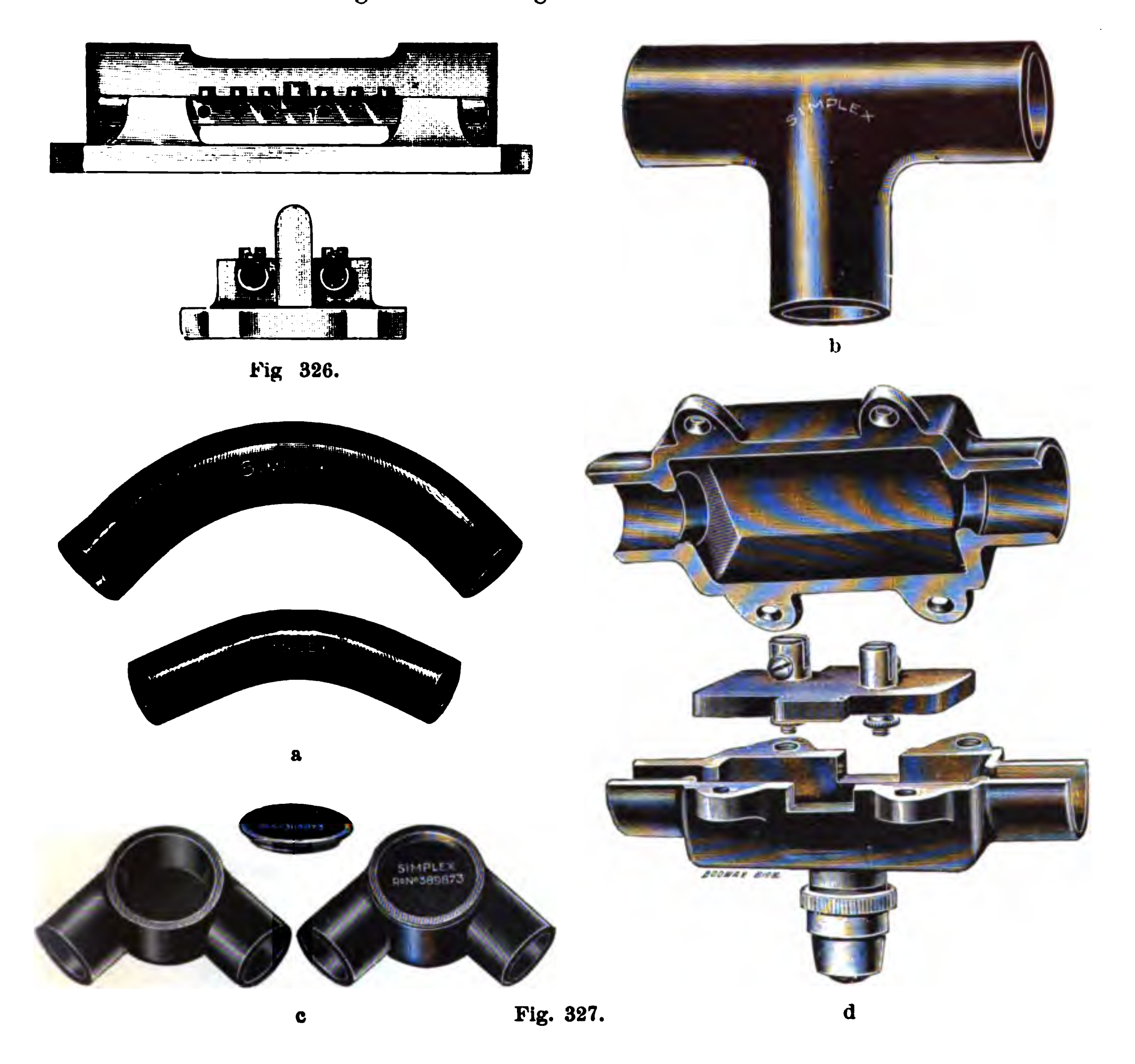


Fig. 326.

a b c d

Fig. 327.

die Rohre auch mit Gewinde geliefert, so dass die Passstücke aufgeschraubt werden und wie Gas- und Dampfleitungen verlegt werden können. Die Arten der Verbindung dieser Rohre zeigt Fig. 326. Bei Verwendung im Freien, wo die Rohre starken Witterungswechseln ausgesetzt sind, verwendet man dieselben galvanisch verzinkt.

Die Simplex-Steel Conduit Co. fabriziert neben den gewöhnlichen geschlossenen Verbindungsstücken auch grosse und kleine Bogen und Halbbogen (Fig. 327a), T-Stücke (Fig. 327b), sowie Bogenstücke mit Deckel (Fig. 327c).

Diese, sowie die T-Stücke mit Deckel übernehmen die gleiche Bestimmung wie bei anderen Rohrsystemen die Dosen. Andere Winkel- und T-Stücke bestehen aus zwei zusammengeschraubten Halbschalen (Fig. 327d) und können so bequem nachträglich einmontiert oder beim Einbau der Leitung als Schliessorgane verwendet werden. Durch die grosse Vielseitigkeit in Bezug auf Zusammensetzung der Rohre ist ein leichtes Arbeiten möglich, indem die Rohre nicht gebogen werden brauchen, um Überbrückungen und Umgehungen vorzunehmen.

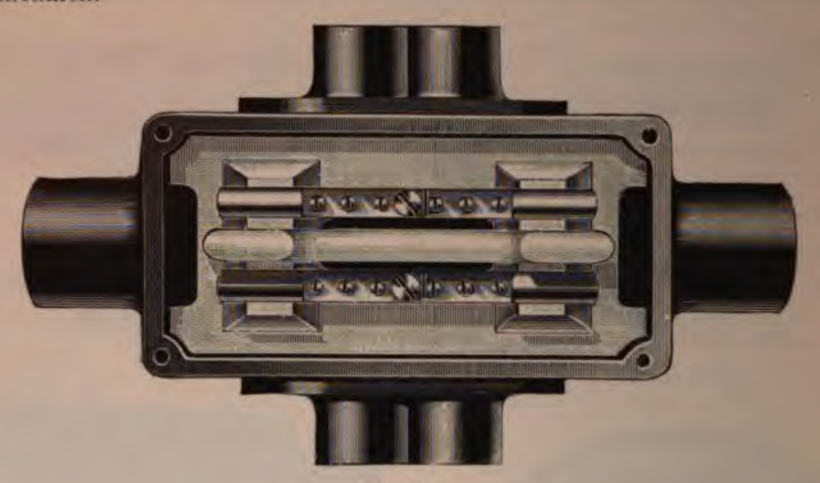


Fig. 328.

Für andere Sorten von Anschlüssen sind Dosen und Winkelkasten konstruiert (Fig. 328) und es ist dabei in Aussicht genommen, eine Anzahl von Stromkreisen gemeinsam durch eine Dose zu führen. Leitungen in den Dosen voneinander zu trennen ist bei gewöhnlichen Montagen in England nicht erforderlich, da die Metallrohre, in denen sie liegen, unter sich doch Verbindung haben. In ein Rohr werden also in England nach diesem System bei der Montage nicht nur die Drähte für einen Stromkreis, sondern für eine ganze Anzahl von Stromkreisen gemeinsam verlegt. In Deutschland ist diese Ausführungsform aber nicht üblich.



Fig. 329. Fig. 330.

Für die Herunterführung zu einem Schalter brauchen oben in den Rohren keine Ablötungen vorgenommen zu werden, sondern es wird der Zuleitungsdraht direkt zum Schalter geführt und gleichzeitig mit dem Zuleitungsdraht ein zweiter Draht unter dieselbe Klemme gebracht, welcher dann weiter zum nächsten Schalter geht und ebenso untergeklemmt wird u. s. w., also als Zuleitung dient. Der andere Draht erfährt natürlich die gleiche Behandlung.

Bei Anschluss einer Hängelampe in dieser Weise (Fig. 329) tritt diese Verlegungsart deutlich hervor, und zwar sind die beiden Drähte der Hauptleitung durch den Porzellanfuss der Abzweigvorrichtung in Schleifenform geschoben und an den Klemmen angeschlossen.

Für die Verlegung einer Anzahl Leitungen durch ein Rohr und beliebiger Abzweigung derselben ist ein in Fig. 328 veranschaulichtes, einfaches Abzweigstück konstruiert. Die Drähte werden gemeinsam in ein Rohr eingezogen, das Drahtpaar wird dann in der Dose an zwei Klemmen angeschlossen und die übrigen Drähte im Boden der Dose in einem Hohlraum des Isolierstückes nach dem nächsten Rohranschluss weitergeleitet. Die Anschlussklemmen sind durch das Isolierstück geführt und dienen auf der anderen Seite zum Anschluss abzuzweigender Leitungen.

Die an den beiden Seiten vorspringenden Lappen legen sich in entsprechende Aussparungen des Unterteiles und klemmen sich so in ihrer Lage fest, so dass ein Verschieben der Klemmen ausgeschlossen ist.

Das Leitungssystem der Safety Concentric Wiring Co., London.

Dieses System besteht aus einem mit Gummi wasserdicht umpressten Leitungsdraht, der aussen mit einer verzinkten oder verzinnten Eisendrahtarmatur versehen ist. Die äusseren Armaturdrähte dienen als Leiter und stellen daher einen geerdeten blanken Leiter dar.

Bei Abzweigungen wird dann ein Teil der Drahtarmatur entfernt und die Isolierung von dem innen liegenden Draht beseitigt. Der abzuzweigende Draht wird um den Hauptdraht herumgeschlungen und verlötet. Die Lötstelle wird dann gut mit Gummimasse isoliert und mehrfach mit Isolierband geschützt.

Um nun eine Verbindung der Drahtarmatur an dieser Lötstelle zu erreichen und diese als Leiter nutzbar zu machen, wird ein T-förmiger Trog verwendet, welcher die mit Isolierband dicht bewickelte Stelle aufnimmt. Eine Metalllegierung dient dann zum Ausgiessen des Troges und verlötet sich mit den Drahtarmaturen zu einer gut leitenden Verbindung.

Bei Anschluss an Glühlichtfassungen ist die Armatur mit letzteren verlötet, so dass die Gehäuse der Glühlichtfassungen stromführend sind. Für starke Beanspruchung ist eine Armatur aus Stahldraht, für leichtere dagegen aus verzinntem Kupfergeflecht vorgesehen.

Zur Verbindung der Glühlampen und Pendel mit den Leitungen dienen Anschlussstücke, bei denen das Metallstück mit der Armatur verlötet wird, während im Innern konzentrisch und isoliert eine Kontaktvorrichtung für den mittleren Draht angebracht ist.

Diese Installationsmethode ist in England vielfach zur praktischen Ausführung gekommen und dürfte sich überall da eignen, wo die Leitungen

einer rauhen Behandlung ausgesetzt sind. Eine Schwierigkeit liegt allerdings in der Abzweigung, da ein dort entstandener Fehler nur sehr schwer auffindbar ist.

Bei grossen Stromstärken, für welche eine Stahldrahtarmatur nicht ausreicht, resp. einen zu grossen Spannungsverlust herbeiführt, werden zwischen die Stahldrähte ein oder mehrere Kupferdrähte eingelegt, welche in paralleler Schaltung mit den Drähten der Armatur den Strom weiterleiten.

Hausanschlüsse.

Hausanschlüsse gehören in den meisten Fällen noch zum Leitungsnetz der Elektrizitätswerke. Sie müssen, da sie nicht immer schnell zugänglich, so sicher wie möglich installiert werden.

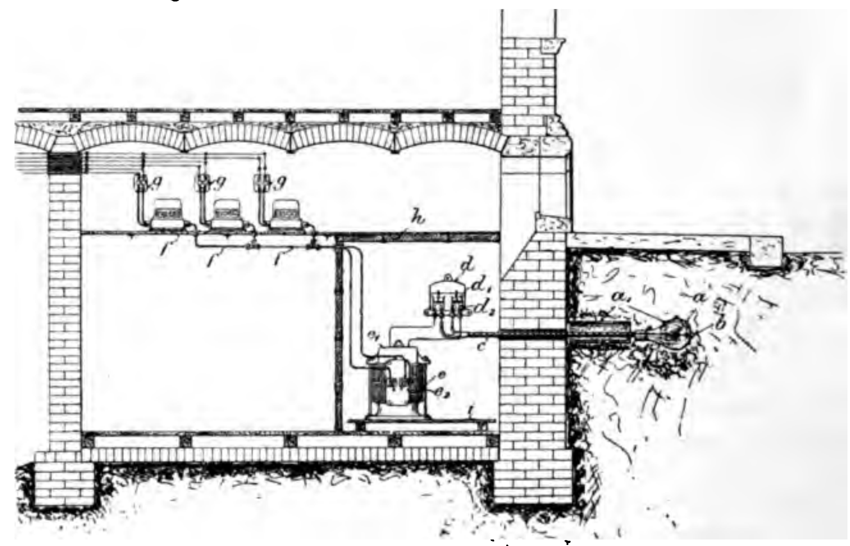


Fig. 331.

Die Ausführung derselben richtet sich nach der Art der Verteilungsleitungen, die unterirdisch als Kabel oder blanke Leitungen oder oberirdisch als Freileitungen geführt sein können.

181. Anschluss an unterirdische Netze.

Der Anschluss an ein Kabelnetz erfolgt entweder unter Vermittelung eines Kabelkastens oder einer Abzweigmuffe. Der erstere ist sicherer als eine Muffe, hauptsächlich wenn die Verteilungsleitungen von beiden Seiten gespeist werden, weil dann innerhalb des Kastens nach beiden Seiten gesichert wird und Störungen auf ein kleineres Gebiet beschränkt bleiben. Indessen ist diese Art der Ausführung viel zu teuer und findet nur dann statt, wenn gleichzeitig von einem Punkt mehrere stärkere Kabel abgehen müssen.

Die Abzweigmuffen, deren Konstruktionen an anderer Stelle[1]) bereits besprochen wurden, sind das üblichste Mittel. Sie werden mit und ohne Sicherung verwendet. Wird aber gesichert, so pflegt man den Schmelzstreifen etwas stärker zu wählen als den im Hause selbst angeordneten.

---

1) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 48 u. ff.

Von der Abzweigmuffe führt ein Kabelstrang auf dem kürzesten Wege nach einem möglichst trockenen Keller- oder Parterreraum (Fig. 331), wo der Transformator, die eigentliche Hausanschlusssicherung,[1]) etwa vorgesehene Schalter und eventuell auch Zähler untergebracht werden. Bei Dreileiteranlagen führt man gern alle drei Leitungen bis zum Hausanschluss, selbst

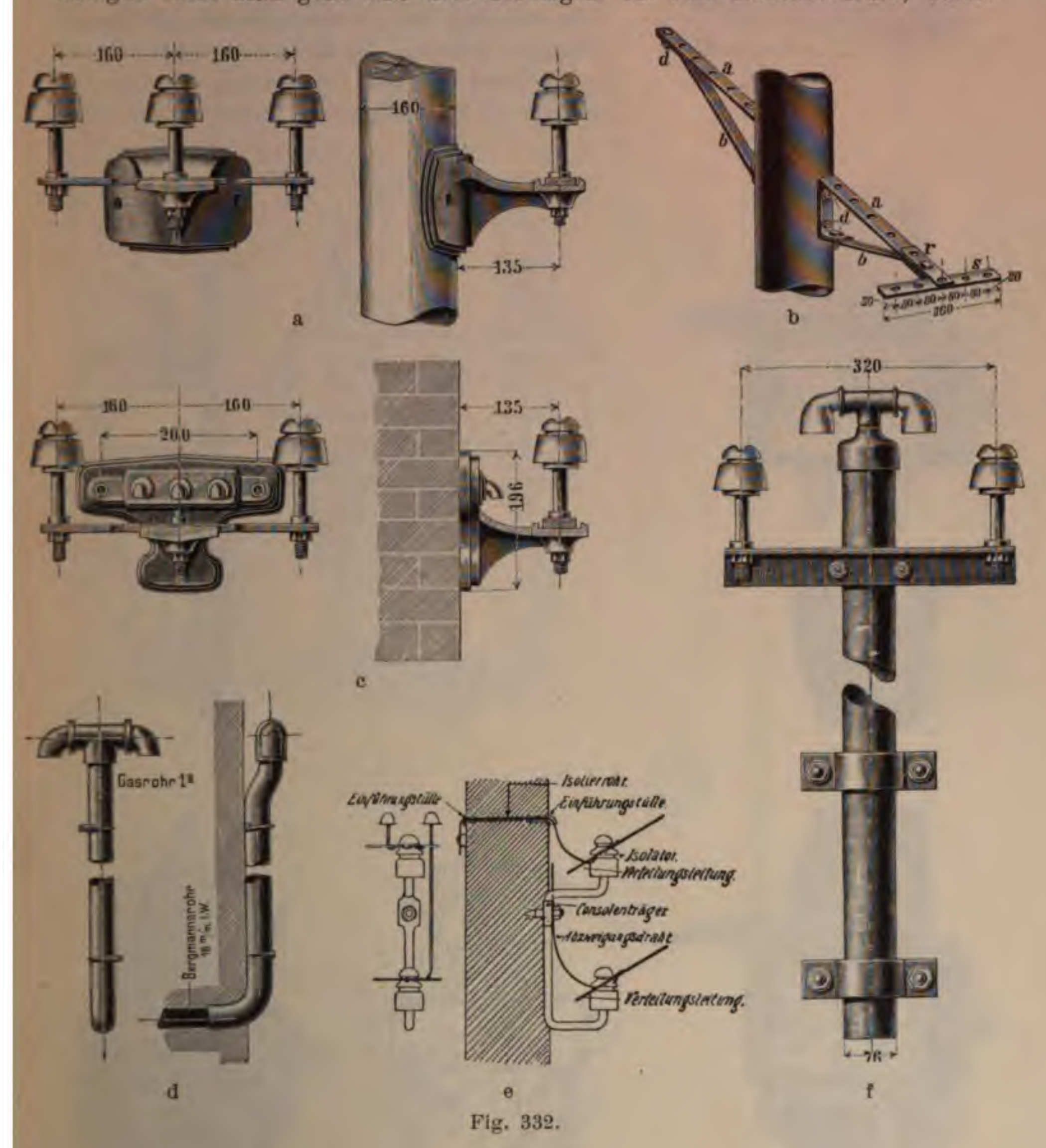


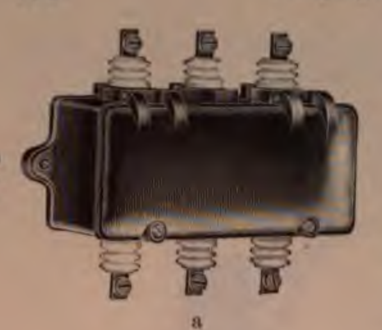
Fig. 332.

wenn man beabsichtigt, von dort nur einen Zweileiterzweig weiterzuführen. Hierdurch ist eine grössere Sicherheit gegeben, da man eventuell leicht von einer Seite des Dreileiternetzes auf die andere umschalten kann.

Im übrigen wird von den meisten Elektrizitätswerken, die eine Dreileiteranlage besitzen, verlangt, dass Hausinstallationen im Dreileitersystem aus-

1) Die Art eines derartigen Hausanschlusses, wie er in Cöln üblich ist, wird im „Handbuch der elektrischen Beleuchtung" von Herzog & Feldmann in Fig. 468 gezeigt.

182. Anschluss an oberirdische Netze.



a

geführt werden müssen. Nur ganz kleine Anlagen dürfen als Zweileiterabzweige ausgebildet werden.

Findet der Hausanschluss an oberirdische Netze statt, so wird man entweder von den Mauerfronten oder vom Dach aus ins Innere gelangen können. Es laufe am Gebäude eine auf Masten verlegte Freileitung vorbei, so müssen am Mast besondere Isolatoren befestigt

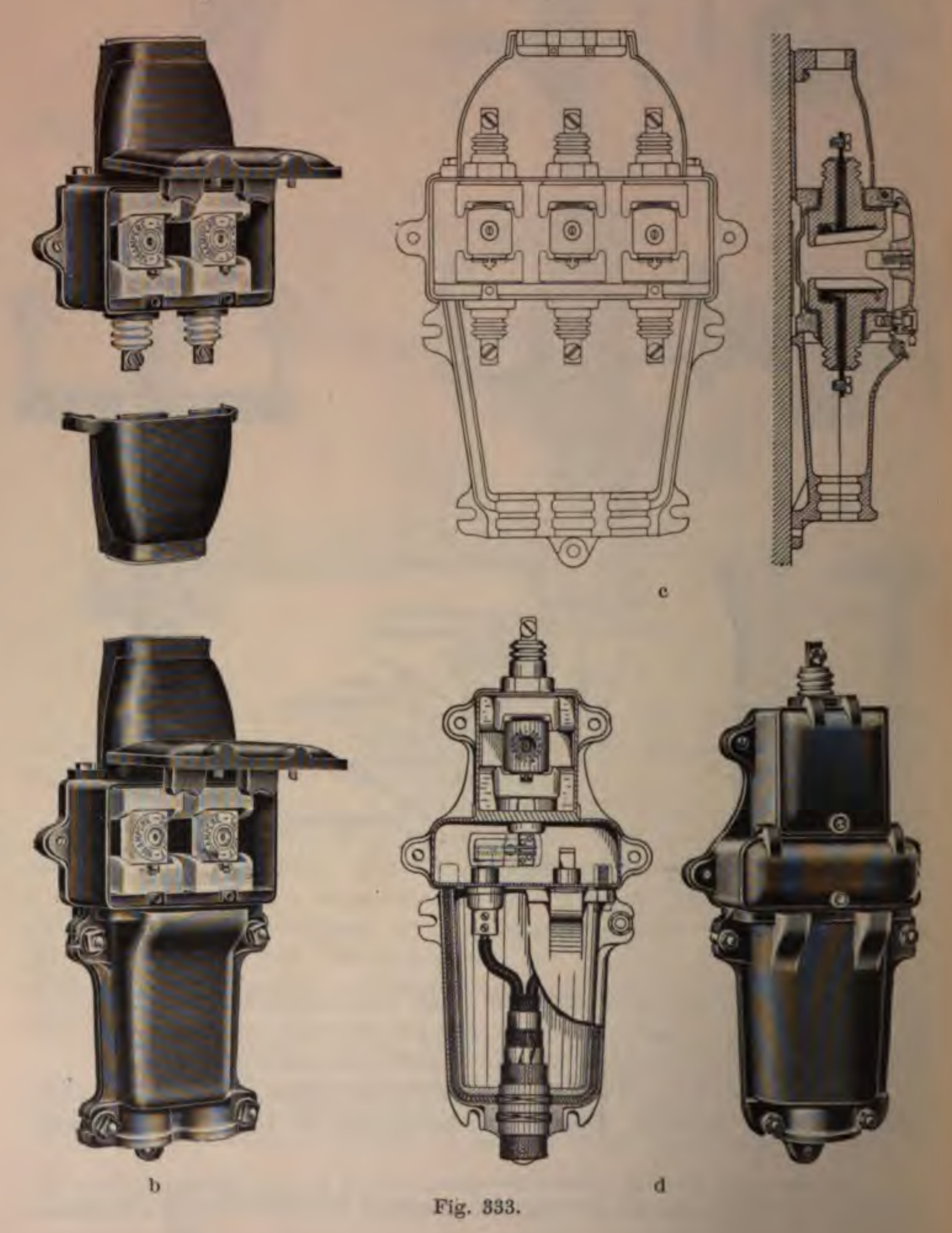


Fig. 333.

werden, von denen man nach Isolatoren überspringt, die am Gebäude befestigt sind. Die ersteren werden so angeordnet, dass sie ein bequemes Abspannen ermöglichen. So werden bei Dreileiteranschlüssen z. B. drei Isolatoren nebeneinander gesetzt (Fig. 332a, SIEMENS-SCHUCKERT Werke, Wien) oder, wenn die Isolatoren auf eisernen Traversen sitzen, die in Fig. 332b wiedergegebene Art gewählt.

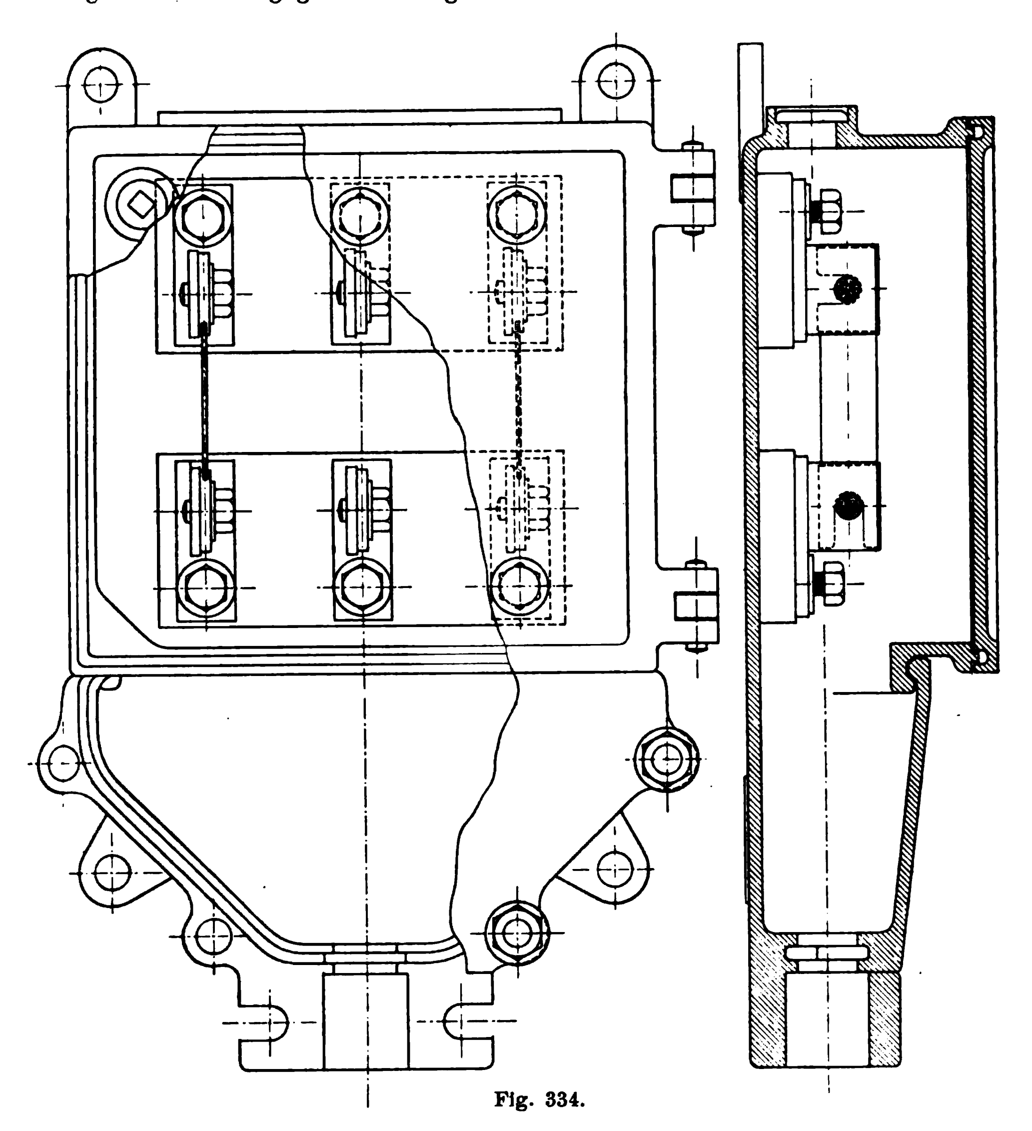


Fig. 334.

Am Hause werden die Leitungen an Isolatoren abgefangen und dann durch Einführungstüllen[1]) geführt. Die SIEMENS-SCHUCKERT Werke, Wien, kombinieren diese Einführungen mit den Isolatoren in der in Fig. 332c wiedergegebenen Form. Eine andere Ausbildung des Hausanschlusses giebt MILLER,[2]) die in Fig. 332e wiedergegeben ist.

1) Vgl. Hdb. VI, 2, S. 240.

2) MILLER, Versorgung der Städte mit Elektrizität.

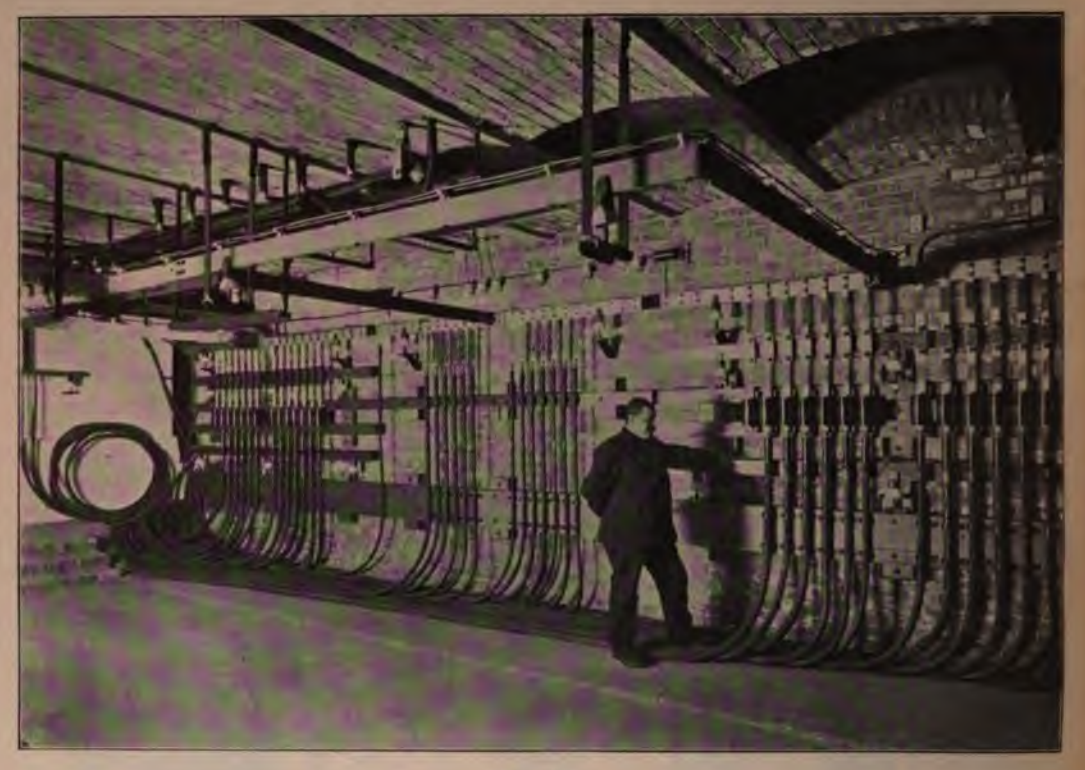


Fig. 335.

Nun ist es nicht immer möglich, an den Stellen in das Haus zu gelangen, an denen die Leitungen abgefangen sind. Man pflegt dann Rohre von hier bis zur Einführungsstelle zu verlegen, die mit besonderen Porzellantrichtern versehen werden (Fig. 332 d).

Schliesslich bleibt noch der Fall zu erwähnen, wo die Leitungen durch das Dach eingeführt werden. Hierzu dienen Dachständer, die aus einem weiten Rohr bestehen, oben eine Traverse für die Isolatoren tragen und durch Porzellanpfeifen abgeschlossen sind, durch welche die Leitungen eingezogen werden. Hierbei ist aber darauf aufmerksam zu machen, dass die Rohre an der Eintrittsstelle in das Dach gut abgedichtet werden müssen. In der Regel sind bei dieser Art der Einführung Dacharbeiten erforderlich, welche die Montage erheblich verteuern.

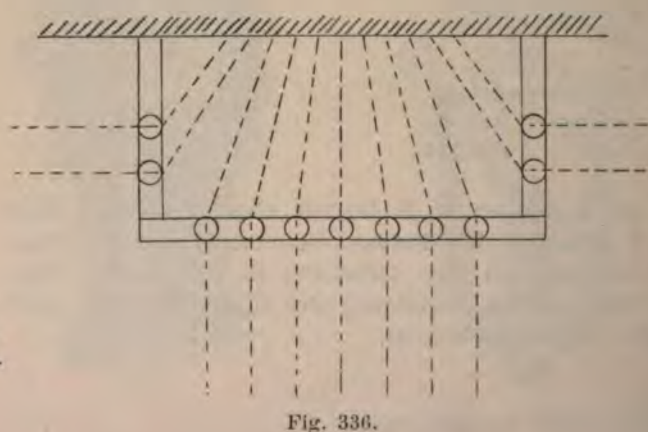


Fig. 336.

183. Haus-anschluss-sicherungen.

Die Sicherungen sind an anderer Stelle[1] bereits besprochen,

1) Hdb. VI, 1, S. 315 u. ff.

daher hier nur erforderlich, kurz auf die für Hausanschlüsse erforderlichen Sicherungen hinzuweisen. Diese Apparate sind stets die gleichen wie für die übrige Installation, dagegen sind sie für diejenigen Anlagen, denen der Strom von einem Kabelnetz aus zugeführt wird, vielfach besonders durchkonstruiert worden, und zwar hauptsächlich von dem Gesichtspunkt, dass die Leitungen bezw. Kabel am Sicherungsgehäuse sicher abgeschlossen werden. Da diese Hausanschlusssicherungen in Kellern untergebracht werden, so ist auf eine möglichst wasserdichte Umhüllung Rücksicht zu nehmen und es entstanden dementsprechend Anschlusskästen aus Eisen in mehr oder weniger gut durchgeführter Form.

So zeigt Fig. 333a ein Sicherungsgehäuse mit aufklappbarem Deckel der Siemens-Schuckert Werke. Die Schwierigkeiten, die sich der wasserdichten Einführung der Leitungen zumeist entgegenstellen, sind hier dadurch umgangen, dass fabrikationsmässig besondere Porzellanisolatoren mit einem absolut wasserdichten Kitt eingesetzt werden, welche ebenfalls wasserdicht eingesetzte Bolzen umschliessen, an die innen und aussen angeschlossen wird.

Bedingung für diese Anordnung sind nun aber wieder besondere Endverschlüsse für die Kabel und unter Umständen auch noch Verbindungsleitungen zwischen diesen und den Anschlusskontakten der Sicherungen. Um diese gegen Beschädigungen zu schützen, sind von den Siemens-Schuckert Werken besondere Leitungseinführungsgehäuse vorgesehen, die Fig. 333b wiedergiebt. An ihre Stelle können Kabelstutzen treten, wie sie Fig. 333c zeigt. Dieser Stutzen ist für drei Einfachkabel bestimmt, kann also nur bei



Fig. 337.

Gleichstrom oder bei ungepanzerten Wechselstromkabeln Verwendung finden. Einen Stutzen für verseilte Kabel der Süddeutschen Kabelwerke zeigt Fig. 334. Schwierig ist bei diesen die Umschaltung, falls bei Dreileiteranlagen die Aussenleiter vertauscht werden sollen. Für diesen Fall haben die SIEMENS-SCHUCKERT Werke die in Fig. 333 d gezeigte Anordnung getroffen. Das Sicherungselement ist oben angeordnet, in der Mitte liegt eine Umschalte-

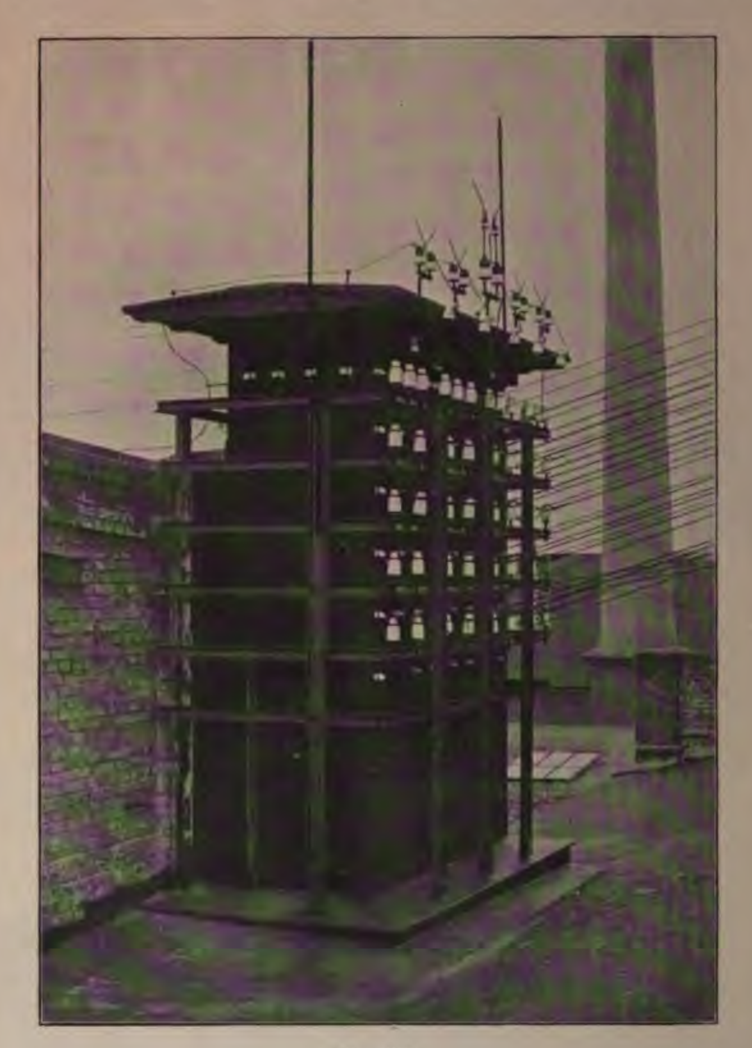


Fig. 338.

lasche, die zwischen dem oberen zur Sicherung führenden Kontakt und dem einen oder anderen von zwei nach den beiden Aussenleitern kommenden Bolzen Verbindung herstellt. Die Umschaltung kann vollständig gefahrlos erfolgen. Der Nullleiter ist im vorliegenden Fall blank gedacht und wird an besonderen Klemmen des Gehäuses angeschraubt.

Von den Elektrizitätswerken gehen grössere Bündel von Leitungen aus, die um so sorgfältiger verlegt werden müssen, als eventuelle Störungen des einen Stranges andere in Mitleidenschaft ziehen können.

Die Leitungen werden in Form von Kabeln oder blanken Leitungen eingeführt, je nachdem es sich um unterirdische oder oberirdische Netze handelt.

184. Einführung der Leitungen in die Elektricitätswerke.

Sinngemäss gilt das im Kapitel „Kabelverlegung" Gesagte auch für diejenigen Kabel, die im Inneren der Gebäude verlegt werden. Kabel sind zu teuer, um in der Installation ausgedehntere Verwendung finden zu können. Sie werden daher zumeist nur als Hauptleitungen verwendet oder bleiben

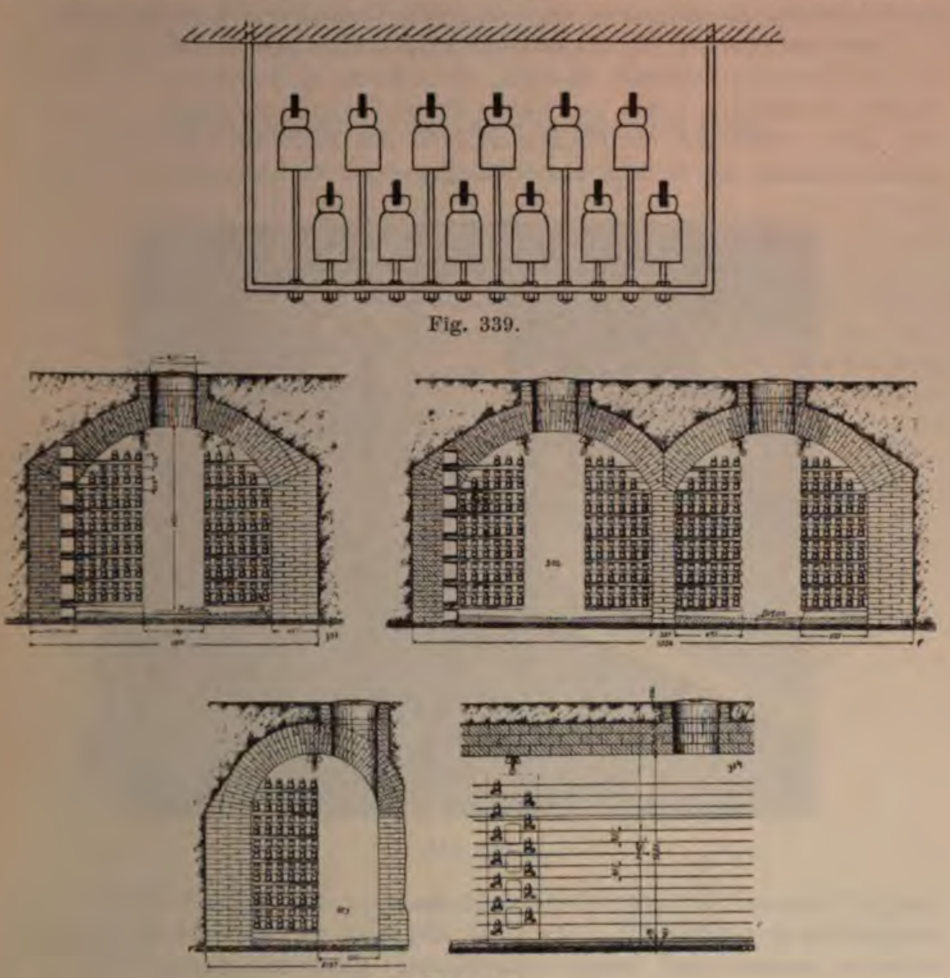


Fig. 339.

Fig. 340.

solchen Anlagen vorbehalten, in denen andere Installationsarten versagen, wie z. B. in gewissen chemischen Fabriken.

Bei der Einführung in Centralen jedoch laufen häufig so viele Leitungen zusammen, dass aus Sicherheitsrücksichten Kabel gewählt werden müssen, für die besondere Einführungskanäle geschaffen werden. In der Regel werden dieselben an einer Stelle zusammengefasst, wie z. B. Fig. 335 zeigt. Aus dieser Abbildung ist auch gleichzeitig zu erkennen, wie die Kabel an der Decke verlegt werden können. Werden zur Befestigung Eisenschellen verwendet, wie Abbildung zeigt, so ist um das Kabel ein Stück Jutezeug zu legen, damit die Isolierung nicht beschädigt werden kann. Senkrecht befestigte Kabel müssen sehr gut festgemacht werden, da sonst die Isolierung rutschen kann und der

oberste Teil des Kupferleiters unter dem Kabelschuh freigelegt wird. Da die äussere Umhüllung der Kabel aus einem leicht entzündlichen Material besteht, so entfernt man dieses gern an solchen Stellen, wo die Eisenarmatur auf andere Weise geschützt werden kann, damit durch den Brand eines Kabels nicht sofort die anderen in Mitleidenschaft gezogen werden. Dies ist bei der Einführung in die Elektrizitätswerke der Fall. Zum Schutz gegen Rost wird die freigelegte Eisenarmatur mit einem nicht brennbaren Lack bestrichen.

Bei oberirdischen Netzen können die Freileitungen in verschiedener Art in die Centrale eingeführt werden. Es können z. B. die in Fig. 270 gezeigten Gestänge in etwas geänderter Form Verwendung finden, hauptsächlich aber, wenn sich die Leitungen nach drei Richtungen verzweigen. Es entstände dann der in Fig. 336 wiedergegebene Verteilungsplan. Derartige

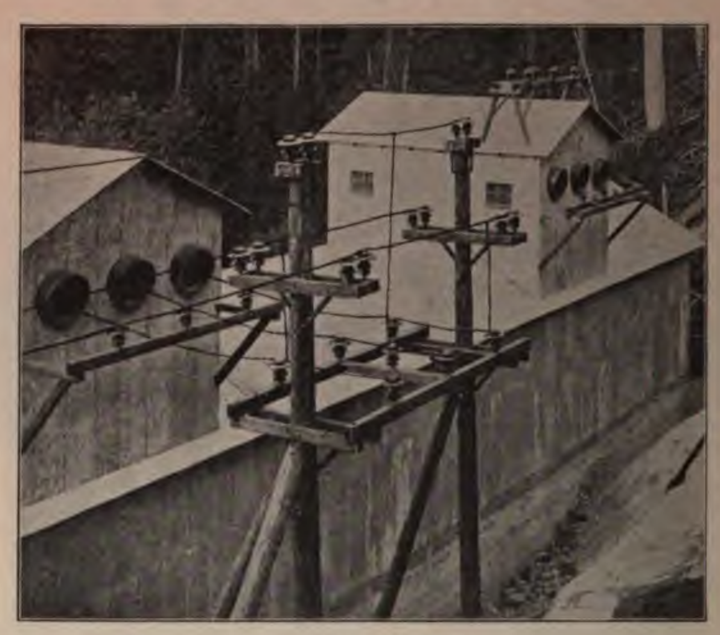


Fig. 341.

„Lagen" können in beliebiger Anzahl übereinander gesetzt werden. Geht man mit den Leitungen nur in einer Richtung ab, so wird die Eisenkonstruktion entsprechend kürzer ausgebildet. Diese Anordnung zeigt z. B. Fig. 137. Hier werden die Leitungen aber nach ihrem Austritt aus der Centrale nicht sofort verteilt, springen vielmehr erst auf einen Verteilungsmast und werden von hier aus nach verschiedenen Seiten abgezweigt. Sichtlich vorteilhafter ist die Anordnung nach Fig. 337, die Transformatorenstation auf der Prag des Elektrizitätswerkes Stuttgart darstellend. Hier ist das Gebäude mit einem kleinen Türmchen ausgestattet, von welchem aus die Leitungen nach allen Seiten gespannt werden können. Vergleiche ferner Fig. 338.

Von der Stelle des Eintrittes der Freileitungen in die Gebäude werden isolierte Leitungen verwendet, deren Verlegung in der üblichen Art[1]) erfolgen kann. Häufig werden auch die Kabel nicht bis zu dem Verteilungspunkte in der Centrale fortgeführt, sondern nur bis zum Eintritt in das Ge-

1) Näheres siehe Hdb. VI, 2, S. 225 f.

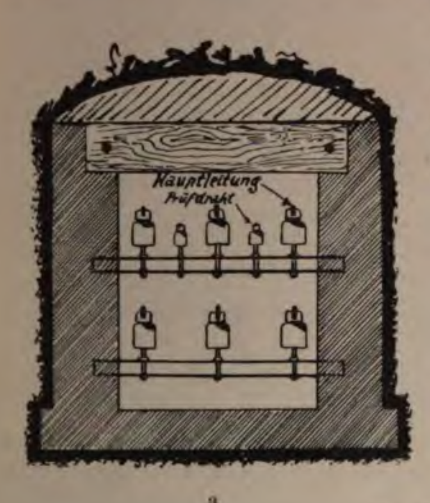
bäude. Die Verbindung erfolgt dann meistens durch Kupferschienen, deren Verlegungsart schon früher[1]) besprochen und in Fig. 335 gezeigt ist. Kommt eine grössere Anzahl von Leitungen zusammen, was bei grossen Centralen leicht der Fall sein kann, so wird die in Fig. 339 gezeigte Verlegungsweise gewählt. Werden die Schienen auf längere Strecken geführt, so werden unter Umständen besondere Tunnel vorgesehen (Fig. 340).

Die Einführung in eine Hochspannungscentrale mit 50 000 Volt zeigt Fig. 341, bei der auch die Art des Anschlusses an die Fernleitung beachtenswert ist.

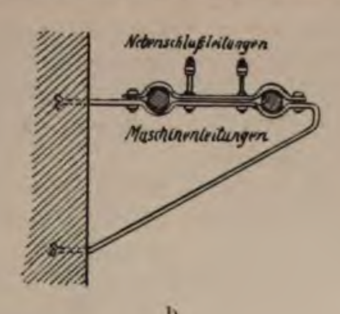
Die Verlegung der Leitungen in speziellen Fällen.

185. Installation in elektrischen Betriebs- und Akkumulatorenräumen.

Für die Verlegung der Leitungen in diesen Räumen ist der erste Grundsatz: Betriebssicherheit. Infolgedessen sind alle Leitungen erlaubt und es wird diejenige Verlegungsart Verwendung finden müssen, welche die grösste Übersicht bietet. Man verwendet daher in allen Fällen, wo grosse Querschnitte erforderlich werden, blankes Kupfer, welches auf Isolatoren irgend welcher Form (etwa nach Fig. 335) verlegt wird. Für Niederspannung ist keine Schutzverkleidung erforderlich, für Hochspannung fordert § 36 b der Sicherheitsvorschriften (Hochspannung) die folgenden Massnahmen:



a



b

Fig. 342.

„Isolierte Leitungen für Spannungen unter 1000 Volt bedürfen keiner Verkleidung. Isolierte Leitungen für Spannungen über 1000 Volt und blanke Leitungen für jede Spannung (über 250 Volt gegen Erde) müssen entweder der Berührung unzugänglich angeordnet oder durch Abschluss in besonderen Räumen oder durch Verkleidung vor Berührung geschützt sein."

Für die Verbindung von den Maschinen zu den Apparaten bezw. Schalttafeln u. s. w. zeigt MILLER[2]) zwei Anordnungen, die in Fig. 342 a u. b wiedergegeben sind.

In Akkumulatorenräumen werden fast ausschliesslich blanke Leitungen verwendet, denen durch einen Anstrich mit Porzellan-Emaillefarbe ein ausreichender Schutz gegen die Zerstörung durch Säure gegeben werden kann. Die Verlegung von Kupferschienen erfolgt auf Isolatoren etwa nach Fig. 275 a, von starkem Rundkupfer auf solchen nach Fig. 275 b. Wenn ge-

[1]) Näheres siehe Hdb. VI, 2, S. 252 f.

[2]) MILLER, Die Versorgung der Städte mit Elektrizität.

ringere Querschnitte zu verlegen sind, so werden die in Fig. 274 wiedergegebenen Bergwerksisolatoren angewendet. Eine derartige Installation zeigt Fig. 343. Die gewöhnlichen Rollen (Fig. 261) sollte man für diese Zwecke nie verwenden.

Isolierte Leitungen können Verwendung finden, wenn sie ebenfalls gegen die Säure geschützt werden. Bezüglich der gasdichten Wanddurchführungen vergleiche S. 242.

186. Installationen in feuchten und durchtränkten Räumen und solchen mit ätzenden Dünsten.

Für Installationen in feuchten Räumen ist mit Gummiader isolierter Kupferdraht zu verwenden, welcher auf Isolatoren verlegt werden soll. Auch blanke Leitung ist für Niederspannung zulässig, jedoch nur unter den in § 41b der Sicherheitsvorschriften gegebenen Einschränkungen. Bei Spannungen über 1000 Volt sind nur Kabel zulässig.

Die zur Verwendung kommenden Drähte (auch solche, welche als Zuleitung zu nur einer Glühlampe dienen) sollen nicht unter 1·5 mm² stark sein. Die Isolatoren sollen mit gutem Cement eingemauert und stets aufrecht stehend sein, damit Nebenschlüsse durch Feuchtigkeit, die sich bei liegenden Isolatoren (bei steigender Leitung u. s. w.) im Innenraum derselben festsetzen kann, vermieden werden.

Der Draht ist vor der Befestigung am Isolator an den Bindestellen mit Isolierband zu bewickeln, damit die Isolation der Leitung nicht beschädigt wird. Wenn bei Mauerdurchgängen die Leitungen nicht frei durchgeführt werden können (wegen grosser Mauerstärke, Bögen u. s. w.), so dass dieselben das Mauerwerk berühren, werden Hartgummirohre von 20 mm lichter Weite eingemauert, wobei jedoch zu beachten ist, dass das Rohr aus einem Stück besteht und auf jeder Seite der Mauer etwa 2 cm herausragt.

Statt der offenen Verlegung kann auch die Verlegung in Rohre Anwendung finden, und zwar empfehlen sich für diesen Zweck Stahlpanzerrohre ganz besonders.

Beide Pole sind bei offener Verlegung entsprechend den Raumverhältnissen soweit wie möglich voneinander entfernt zu verlegen und von beiden Seiten erst nach der Lampe abzuzweigen. Wichtig ist der Anschluss an die Lampen. Schuckert wendete die folgende Montageart an:

Die Lampen (Kellerfassungen) bestehen aus einem emaillierten Blechschirm, an dessen Unterseite zwei Porzellanrollen befestigt sind. In der Mitte des Schirmes befindet sich eine Öffnung, durch die der Gewindeteil eines Fassungshalters mit Bügel gesteckt wird (Fig. 344), so dass dieser zum Aufhängen des Ganzen dient und an das Gewinde die Fassung angeschraubt werden kann. Diese letztere ist ein Porzellanstück, an dem der metallene Gewindeteil zur Aufnahme der Glühlampe sitzt. Dieser Gewindeteil dient gleichzeitig als Pol und ist mit einer Schraube zur Festklemmung des Leitungsdrahtes versehen. Der zweite Pol wird durch eine Schraube gebildet, die innerhalb des Gewindeteils in den Porzellankörper eingeschraubt wird und mit welcher man gleichzeitig den durch eine seitliche Durchbohrung des Porzellansockels eingeführten Leitungsdraht des zweiten Pols festklemmt.

Es ist selbstverständlich, dass ein Anheften der Leitung, auch geerdeter Mittelleiter, an die Wand vermittels eiserner Krampen, sowie eine Führung auf Isolierrollen ausgeschlossen ist.

Zum Festhängen der Beleuchtungskörper (Kellerlampen) dienen S-Haken aus verzinktem Eisendraht von 4 mm Durchmesser (s. Fig. 344). Kommen Wandarme zur Verwendung, so müssen auch auf diese die Porzellanfassungen

und Blechschirme mit Isolierrollen geschraubt und die Zuleitungen ausserhalb des Rohres zur Fassung geführt werden. Ausschalter oder Bleisicherungen sind möglichst an die trockensten Stellen zu setzen, mit den zu unterbrechenden Leitungen sorgfältig zu verbinden und wasserdicht zu schliessen.

Es ist darauf Rücksicht zu nehmen, dass sich durch häufige Temperaturunterschiede in wasserdichten Ausschaltern und Bleisicherungen Feuchtigkeit niederschlägt, so dass zur Montage solcher Apparate möglichst Orte gewählt werden müssen, an denen die Temperaturübergänge nicht allzu schroff auftreten.

Die Kappen der Ausschalter und Sicherungen sind von Zeit zu Zeit abzuschrauben und die Kontakte von etwa anhaftendem Oxyd mittels einer



Fig. 343.

harten, trockenen Bürste zu reinigen. Das Gewinde ist vor dem Festschrauben mit Talg oder Stearin zu überstreichen, um Eindringen von Feuchtigkeit zu verhüten. Isolatorstützen müssen entweder verzinkt oder mit gutem Asphaltlackanstrich versehen sein. Holzschrauben müssen ausschliesslich aus Messing hergestellt sein.

Zu beachten ist, dass nach feuchten Räumen führende Leitungen abschaltbar[1]) sein müssen, selbstverständlich allpolig. Man thut gut, diese Schalter so oft wie möglich geöffnet zu halten, um elektrolytische Zersetzungsprozesse soviel wie möglich zu vermeiden. An anderer Stelle[2]) ist bereits

1) § 41a der Sicherheitsvorschriften.
2) Hdb. VI, 1, S. 198, Marginale 264.

darauf hingewiesen worden, dass in Gleichstromanlagen diesen störenden Einflüssen durch häufige Umkehrung der Stromrichtung wesentlich gesteuert werden kann.

In vielen Fabriken gesellen sich nun zur Feuchtigkeit noch Substanzen, welche dieselbe gut leitend machen. In erster Linie geschieht dies in chemischen Fabriken, Zuckerfabriken, in Gerbereien, gewissen Teilen der Schlacht- und Kühlhäuser. Durch die Einwirkungen der Säuren und Alkalien wird der Isolationswiderstand der ganzen Anlage ein wesentlich geringer; er ist überaus schwierig auf einer angemessenen Höhe zu erhalten. In gleichem Masse aber wie die Leitungen u. s. w. von den schädlichen Einflüssen mitgenommen werden, sind Einwirkungen auf den menschlichen Körper bemerkbar, der wesentlich weniger widerstandsfähig gegen elektrische Ströme wird. Durch beide Umstände sind die ersten Vorbedingungen für die persönliche Sicherheit[1]) gegenüber elektrischen Schlägen aufgehoben und es müssen in derartigen Anlagen Massnahmen getroffen werden, welche den Schutz des Arbeiters gewährleisten. Insbesondere wird die Leitungsverlegung so gewählt werden müssen, dass einmal der Isolationszustand der Anlage so günstig wie möglich wird und ferner müssen Schutzvorrichtungen den Arbeiter von der Berührung der Leitungen abhalten. Die weniger zugänglichen Leitungen können offen verlegt werden; es muss jedoch in jeder derartigen Anlage durch Plakate mit deutlich sichtbarer Schrift vor der Berührung der Leitungen gewarnt werden.

In solchen Räumen, in denen ätzende Dünste auftreten, treten die bereits vorher erwähnten störenden Einflüsse noch mehr hervor; in vielen Räumen hält kein Leitungsmaterial stand und muss häufig neu installiert werden. Verfasser schrieb[2]) an anderer Stelle hierüber: „Es wird bei der Installation von Leitungen in derartigen Räumen zunächst die Frage aufzuwerfen sein, ob die üblichen Verlegungsarten genügen, wenn die Leitungen und die Befestigungsstellen durch einen Überzug aus irgend einer Farbe, einem Emaillelack u. s. w. den unmittelbaren Einwirkungen der schädlichen Substanzen entzogen werden. Bei Beantwortung dieser Frage ist in erster Linie die Örtlichkeit von ausschlaggebender Bedeutung. In vielen Fällen kann dieses Auskunftsmittel genügen, wenn es sich um gut gelüftete Räume handelt, es versagt sicher, wenn dies nicht der Fall ist.

Am häufigsten sind es wohl die Installationen in Viehställen, die zu vielen Klagen Anlass geben und zumeist sehr geringe Isolationswerte aufweisen. Handelt es sich um moderne, hohe und luftige Räume, so wird es genügen, blanke Kupferleitungen auf Bergwerksisolatoren oder Mittelspannungsrollen (Fig. 264) zu verlegen, wie gewöhnlich mit blankem Kupferbindedraht abzubinden und dann die Leitungen und die Verbindungsstellen sehr sorgfältig dreimal mit Porzellan-Emaillefarbe zu streichen. Die Stellen der Leitungen, welche an den Isolierstücken befestigt werden sollen, sind während der Verlegung schon einmal zu überstreichen und der Bindedraht vor Gebrauch in die Farbe zu tauchen, weil beim Streichen nach der Verlegung der Pinsel nicht an die Stellen zwischen Leitung und Rolle dringen kann, hier infolgedessen die Leitung ungeschützt bleibt und die Dämpfe ihre zerstörende Wirkung beginnen können. Sind die Räume niedrig, so dass

---

1) Näheres siehe im Kapitel „Persönliche Sicherheit" Hdb. VI, 2.

2) POHL, Montage elektrischer Licht- und Kraftanlagen, Hannover 1903.

die Gefahr einer unbeabsichtigten Berührung der Leitungen in den Bereich der Möglichkeit gezogen werden muss, so ist blanker Draht nicht anwendbar, die übliche, aber keineswegs empfehlenswerte Installation erfolgt dann mit Gummiband isoliertem Draht, der aber noch sorgfältiger als die blanken Leitungen den chemischen Einflüssen entzogen werden muss. Empfehlenswerter ist die Verwendung von isolierten Leitungen, welche mit einem Bleimantel umpresst sind. Lassen die Örtlichkeiten eine Verkleidung der Leitungen in genügendem Abstande zu, so können blanke Leitungen hierdurch gegen Berührung geschützt werden. Wenn aber irgend möglich, sind in Ställen Verkleidungen zu vermeiden, da sich in denselben stets Schmutz ansammelt, der unter Umständen ernste Brandgefahr herbeiführen kann. Am unangenehmsten sind die in Pferdeställen auftretenden Ammoniakdämpfe, denen selten ein Material auf die Dauer widersteht.

Ist von vornherein anzunehmen, dass offen verlegte Leitungen zu Isolationsfehlern Anlass geben werden, so verwendet man Stahlpanzerrohr mit

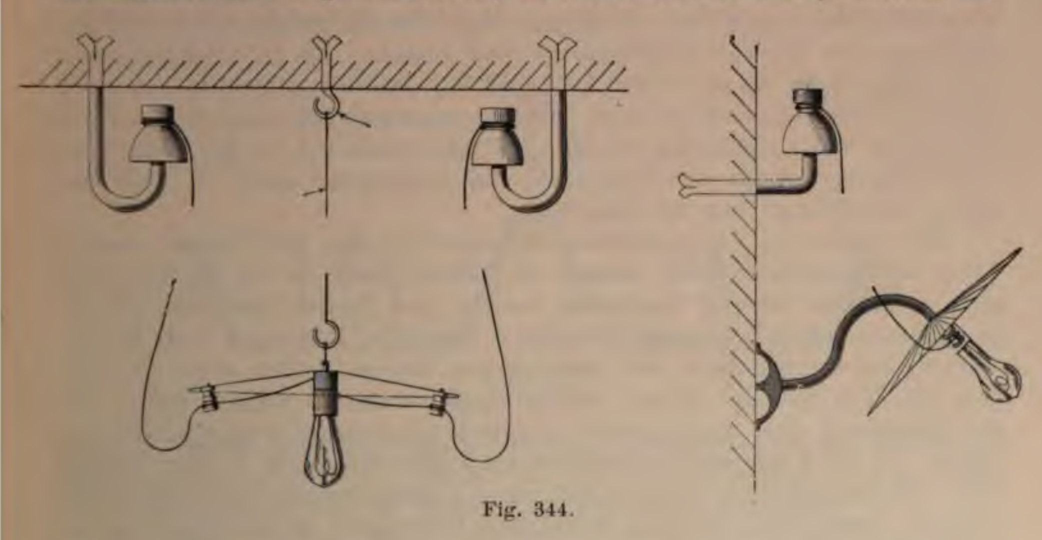


Fig. 344.

Isolierrohreinlage, in welches Gummibandleitungen (G. B.) eingezogen werden. Die Stossstellen sind sehr sorgfältig abzudichten und das ganze Rohrsystem mit Ölfarbe zu streichen. Es empfiehlt sich das Rohrsystem nach Räumen zu, in denen möglichst trockene, von Staub und sonstigen schädlichen Substanzen freie Luft herrscht, offen zu lassen. Es wird dann in dem Rohrsystem ein gesunder Luftstrom zirkulieren, der die durch die Stossstellen etwa eingedrungenen ätzenden Dünste in ihrer Wirksamkeit wesentlich beschränken wird. Schalter und Sicherungen können innerhalb der Ställe angebracht werden, werden aber der Verlegungsart der Leitungen entsprechend in gusseiserne Schutzkästen eingesetzt. Die einmündenden Rohre sind gegen die Schaltergehäuse gut abzudichten. Selbst wenn offen verlegte Leitungen verwendet werden, sind Schalter und Sicherungen in Schutzkästen unterzubringen, die in diesem Falle aus Holz bestehen können. Sie werden aber, um das Eindringen von Staub zu vermeiden, mit Filz abgedichtet und die Leitungen durch besondere gut abdichtende Einführungstüllen ins Innere geführt. Die Verwendung von Isolierrohren ohne Metallschutz ist nicht gestattet. Ein Messingüberzug, der vielfach Anwendung gefunden hat, ist nicht

ratsam, da der Messingmantel zumeist nur eine Stärke von 0·1—0·2 mm hat, den chemischen Einflüssen also kaum lange standhalten kann. Nach der Verwitterung des Messingmantels wird das Papierrohr schnell zerstört.

Für Räume, in denen Salzsäure- oder Schwefelsäuredämpfe auftreten, genügen die im Vorstehenden besprochenen Anordnungen selten, um eine möglichst gute Isolation herbeizuführen. Die Verlegung von Stahlpanzerrohr dürfte, wenn ein geeigneter Überzug aus säurefester Emaillefarbe für die Rohre verwendet wird, noch am geeignetsten sein. Die Abdichtungen müssen sehr sorgfältig gemacht werden, Schalter und Sicherungen werden ausserhalb der betreffenden Räume untergebracht. Die Zuleitungen zu den Lampen sind auf dem kürzesten Wege zu verlegen. Die Einführung in die Lampen erfolgt zweckmässig unter Benutzung einer gusseisernen Dose, in die das Rohr mit Mennige fest eingeschraubt wird und in deren Deckel der Anschluss für den Beleuchtungskörper mit Gasgewinde eingedreht wird. Alle Lampen müssen mit Überglocken, die dicht schliessen, versehen sein. Die Armatur selbst besteht aus Porzellan. Als sicheren Schutz kann man die Umhüllung der blanken Leitungen mit Blei ansehen, sei es, dass dieselben auf galvanischem Wege verbleit sind, sei es, dass sie mit einem nahtlosen Mantel aus Blei umpresst werden. Mit Blei umpresste Leitungen liefert jedes Kabelwerk, die Umpressung erfolgt, wie beim Bleikabel, in der Bleipresse. Die Verlegung erfolgt auf Isolatoren, die Befestigung durch in Teer getränkte Hanfschnur oder mit Bleidraht.

Die Installation bleigeschützter Leitungen an sich macht keine wesentlichen Schwierigkeiten, nur müssen sie, zumal wenn sie nur verbleit sind, mit der grössten Sorgfalt behandelt werden, um die Schutzschicht nicht zu beschädigen. Man verwende möglichst ungeteilte Leitungen und verlege Abzweigstellen ausserhalb der säurehaltigen Räume, selbst wenn dadurch eine erheblich grössere Menge von Leitungen verwendet werden sollte. Ist die Herstellung einer Abzweigstelle innerhalb des Raumes aber nicht zu umgehen, so kann sie auf die folgende Art sicher hergestellt werden. Nachdem die durchgehende Leitung auf einer kurzen Strecke vom Blei befreit und die abzweigende Leitung in üblicher Weise ohne Verwendung von angreifenden Säuren abgelötet ist, wird der Bleimantel sorgfältig von der Oxydschicht befreit und durch Auftragen von metallischem Quecksilber mittels eines Leinwandläppchens gut verquickt. Die Abzweigstelle wird dann mit flüssigem Blei umgossen. Als Hilfsmittel hierzu wird eine zweiteilige, gut angewärmte Form verwendet, die mit einer Eingussöffnung und zwei seitlich angebrachten Löchern, durch welche die Luft entweichen kann, versehen sein muss. Die Form muss mindestens so breit hergestellt werden, dass auf jeder Seite die ungelösten Bleimäntel auf mindestens 5 cm mit Blei umgossen werden. Damit möglichst Blasenbildung beim Eingiessen vermieden wird, durch die die Abzweigstelle nicht mehr zuverlässig sein würde, muss das Blei sehr langsam und nicht zu heiss eingegossen werden. Die Abzweigstellen sind so zu befestigen, dass ein Zug weder auf die Lötstelle, noch auf den Bleimantel ausgeübt werden kann.

Werden Kabel verwendet, so ist ihre Isolierung den chemischen Einflüssen durch einen Bleimantel zu entziehen, der sich über der etwa vorhandenen Eisenarmatur befinden muss. In diesem Falle hätte das Kabel also zwei Bleimäntel. Werden die Kabel in das Mauerwerk gelegt, so müssen sie in Gips gebettet werden. Über den Gips darf dann der gewöhnliche Putz geworfen werden.

Salpetersäure greift alle Metalle, die für elektrische Leitungen in Frage kommen, so an, dass ihr Bestand von ungemein kurzer Dauer wäre. Auch der Überzug mit säurefesten Farben bietet nicht mehr einen so sicheren Schutz, dass hierdurch die Sicherheit einer elektrischen Leitung gegen Zerfressen gegeben wäre.

Man verlege daher so wenig wie möglich Leitungen in diesen Räumen, sondern immer nur ausserhalb derselben und führe die Leitungen durch Isolierrohre, welche mit Stahlpanzer geschützt sind, immer nur an den Stellen in die mit Salpetersäuredämpfen geschwängerten Räume, an welchen sich die Beleuchtungskörper befinden, wenn man es nicht vorziehen sollte, die Beleuchtung von aussen vorzunehmen. Im ersteren Falle wird man die Armaturen so befestigen, dass die Stahlrohre unmittelbar nach ihrem Austritt aus der Wand in sie hineinführen. Im zweiten Falle werden die Armaturen in die Wände eingelassen und durch Glasfenster vollständig vom Raum abgetrennt.

In Räumen, in denen kalkhaltige Laugen oder Essigsäure verarbeitet werden, ferner überall da, wo organische Stoffe in Berührung mit dem

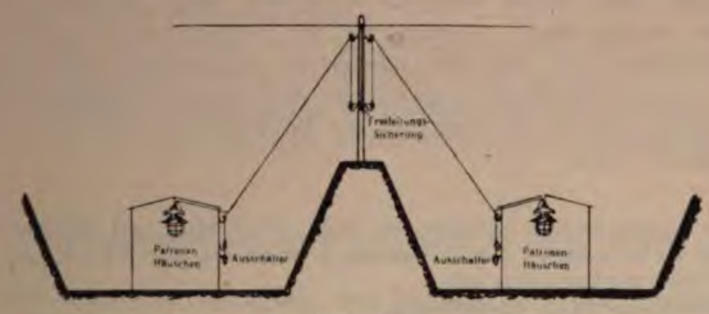


Fig. 345.

Leitungsmaterial kommen können, sind nur blanke Leitungen mit geeignetem Anstrich zu verwenden. Verbleite oder mit Blei umpresste Leitungen sind sehr ungeeignet, da Blei in diesem Falle sehr stark angegriffen wird.

In diesen Räumen müssen die Leitungen auf das sorgfältigste gegen Berührung geschützt werden.

187. Installation in feuer- und explosionsgefährlichen Betriebsstätten und Lagerräumen.

An anderer Stelle dieses Bandes[1]) ist auseinandergesetzt, was man unter einem feuer- oder explosionsgefährlichen Raum zu verstehen hat. Hier sei nur auf die übliche Art der Installation der Leitungen in diesen Räumen hingewiesen, die stets in Rohre verlegt werden müssen, wenn nicht Kabel verwendet werden. Es kann indessen in solchen Räumen, in denen durch die leiseste Ursache explodierbare Stoffe sich ansammeln, wünschenswert sein, jede Leitung zu vermeiden. In diesem Fall werden die Räume von aussen erleuchtet.

Während in feuergefährlichen Räumen bewegliche Leitungen erlaubt sind, wenn sie eine wasserdichte Gummiisolierung besitzen, werden diese in explosionsgefährlichen Räumen überhaupt verboten.[2])

Einer interessanten Beschreibung[3]) der Anlage in der Rheinischen Dynamitfabrik Filiale Leimbach ist die in Fig. 345 wiedergegebene Leitungsanordnung entnommen. Die Verteilungsleitungen sind blank auf Masten geführt, die Ab-

1) Hdb. VI, 2, Feuersicherheit.
2) Siehe Tabelle S. 320 u. 321.
3) EA 1903, S. 695.

zweige zu den einzelnen Häuschen nach Fig. 345 hergestellt. Die Verlegung der Gummiader erfolgte in Stahlpanzerrohr in den folgenden Räumen: Patronenhäuschen, Verpackung, Abscheidung, Waschhaus und Nitrierung.

Überhaupt keine Leitungen wurden in das Sprengöllager, Kollodiumwolle-Trockenhaus, Menghaus und Salpetermulde eingeführt. Die Beleuchtung erfolgte daher von aussen durch die Fenster.

188. Die Installation in Schaufenstern, Warenhäusern etc.

Die vielfachen Schaufensterbrände, die ihre Ursache meistens darin finden, dass leichte Stoffe den Lichtquellen zu nahe gebracht werden, haben zu strengeren Massnahmen der Polizeiverwaltungen geführt.[1]) Vielfach ist auch beobachtet worden, dass Stoffe an Schnurleitungen durch Stecknadeln oder dergl. befestigt und hierdurch Kurzschlüsse eingeleitet wurden.

Es ist daher in erster Linie Bedingung, die Leitungen gegen mechanische Beschädigungen zu schützen. Es ist dies nicht schwer, wenn Rohrverlegung gewählt wird und die Anschlüsse an die fest montierten Beleuchtungskörper so erfolgen, dass die Leitungen an keiner Stelle freiliegen.

Wesentlich schwieriger ist die Stromzuführung zu transportablen Beleuchtungskörpern, von denen übrigens stets nur einer an eine Leitung angeschlossen werden darf. Gerade für die Dekorationen in Warenhäusern und Schaufenstern ist aber die elektrische Beleuchtung von grösster Bedeutung. Durch geschickt angeordnete Glühlampen können wundervolle Effekte erzielt werden, so dass auf die Beweglichkeit der Armaturen nicht gern verzichtet wird.

---

1) Der Polizeipräsident in Berlin hat unter dem 1. März 1904 eine Verfügung über Beleuchtung der Schaufenster und Schaukästen erlassen, die, soweit sie sich auf elektrische Anlagen bezieht, wiedergegeben sei.

1. Beleuchtung durch Bogenlampen:
   a) Der Raum, der die Bogenlampe enthält, ist in der ganzen Breite und Tiefe des Schaufensters durch mindestens $2^1/_2$ mm starke, in Metallrahmen verlegte Glasplatten, welche thunlichst unmittelbar unter der Lampe anzubringen sind, von den ausgelegten Waren abzutrennen.
   b) Der Raum über den Glasplatten darf zur Auslage von brennbaren Gegenständen nicht benutzt werden.

2. Beleuchtung durch Glühlampen oder andere diesen gleichzustellende Beleuchtungskörper (z. B. Nernstlampen, Osmiumlampen, Liliputbogenlampen):
   a) Glühlampen und ähnliche Beleuchtungskörper dürfen im Auslegeraum nur in feuersicheren Schutzkästen oder in Glasglocken (Überglocken), welche mit ausreichenden, den Luftdurchzug gestattenden Öffnungen versehen sind, angebracht werden.

      Die Fassungen müssen dabei derart mitumschlossen sein, dass sie mit den ausgelegten Waren nicht in Berührung kommen können.
   b) Die Leitungen müssen in Isolierrohren verlegt sein. Bewegliche Leitungen innerhalb des Auslegeraumes sind nicht zulässig.
   c) Die ausgelegten Waren sind in angemessenem Abstande (etwa 10 cm) von den Beleuchtungskörpern zu halten.

II. Für Schaukästen, welche im Innern beleuchtet werden und leicht entzündliche Gegenstände enthalten, gelten, sofern sie in den Eingängen oder Durchfahrten von Geschäftshäusern angebracht sind, die gleichen Bestimmungen wie für die Beleuchtung der Schaufenster.

Befinden sich die Schaukästen an der Strassenfront, so können, je nach Lage des Einzelfalles, die Anforderungen nach jenen Vorschriften ermässigt werden. Zum Beispiel können Glühlampen von nicht mehr als 40 Watt Elektrizitätsverbrauch ohne Einhaltung eines Mindestabstandes von den ausgelegten Waren verwendet werden, wenn die Lampen von einer ventilierten Glashülle vollständig umschlossen und wenigstens 20 cm voneinander entfernt und die Schaukästen selbst mit Ventilation versehen sind.

Es können zwei Wege eingeschlagen werden:

1. Die Zuführung erfolgt durch Mehrfachleiter, die durch die Art ihrer Konstruktion (Panzeradern) oder durch die Art der Montage (Überziehen von Metallschläuchen) mit Metall umhüllt sind.

Dieser Metallmantel muss mit dem Mantel der Fassung in Verbindung gebracht und geerdet werden. An und für sich muss ja diese bewegliche Leitung durch Stecker und Sicherung abgezweigt werden; im vorliegenden Fall muss in dem Stecker ein dritter Kontakt für die Erdverbindung angebracht sein, der aber die Verbindung mit der Erdleitung (eventuell geerdetem Mittelleiter) früher herstellt als wie mit den beiden anderen Leitungen, oder

2. Es werden Mehrfachleitungen gewählt, die in Leder oder Segelleinen eingenäht oder mit starken Hanfschnüren umklöppelt sind. Hierfür sind aber ebenfalls mindestens Gummiaderschnüre zu wählen.

189. Leitungen in Theatern.

Mehr noch als in den vorstehend erwähnten Räumen ist der Verlegung der Leitungen in den Bühnenhäusern der Theater Aufmerksamkeit zu schenken. Für die Räume der Theater, welche dem Publikum zugängig sind, gelten die allgemeinen Sicherheitsvorschriften.

Im grossen und ganzen wird die Verlegung der Leitungen in Rohre verlangt, die aber irgend einen Metallschutz haben müssen.

Mehrfachleitungen müssen gegen mechanische Verletzungen geschützt sein. Ausnahmen sind bei vorübergehend gebrauchten Szeneriewechseln gestattet.[1])

Die Leitungen und ihre Verlegung in Bergwerken.

190. Allgemeines

Bei der Wahl und Verlegung von Leitungen in Bergwerken sind in erster Linie die eigenartigen Verhältnisse zu berücksichtigen, welche der Bergbau mit sich bringt, und zwar wird in erster Linie ausschlaggebend sein, ob in den in Frage kommenden Teilen des Bergwerkes Schlagwetter auftreten oder nicht. Welche Bergwerke als Schlagwettergruben aufzufassen sind, bestimmen die Oberbergämter; es werden aber auch in solchen Bergwerken, welche an und für sich Schlagwetter führen, einzelne Schächte und Strecken als schlagwetterfrei angesehen, und zwar hauptsächlich die, in welche die frischen Wetter eingeführt werden.

Für die Installation in Bergwerken hat der Verband deutscher Elektrotechniker besondere Vorschriften erlassen (§ 46 der Sicherheitsvorschriften), in denen besonders die persönliche Sicherheit und die Sicherung gegen Explosionsgefahr Berücksichtigung gefunden haben. Während nach diesen alle Teile des Bergwerkes, welche unter Tage liegen, installiert werden müssen, gelten für die über Tage liegenden Teile die allgemeinen Sicherheitsvorschriften.

191. Installation in Maschinenkammern.

Als Aufstellungsort für elektrische Maschinen, Pumpen, Haspel u. s. w. werden in der Regel besondere Maschinenkammern ausgeschossen, die nur instruiertem Personal zugänglich sind. Soweit nun solche Räume keine Schlagwetter führen, sind für sie die erschwerenden Bestimmungen der Bergwerksvorschriften nicht in Geltung, sie können daher nach den allgemein über Tage gültigen Regeln installiert werden. Sowie jedoch in den Maschinen-

1) Näheres siehe § 45 der Sicherheitsvorschriften und Tabelle S. 320 u. 321.

kammern Schlagwetter auftreten können, müssen alle Vorsichtsbedingungen erfüllt werden, um eine Entzündung der Schlagwetter zu vermeiden.

Infolge der Eigenart des Bergwerksbetriebes müssen wir, abgesehen davon, dass bereits das Vorhandensein von Schlagwettern eine besondere Wahl und Verlegungsart des Leitungsmaterials erfordert, noch trennen in solche Teile, welche senkrecht einfallen (Schächte), sowie solche Strecken, welche eine grössere Neigung als 45° gegen die horizontale haben und in solche, welche horizontal verlaufen oder eine geringere Neigung als 45° aufweisen.

Leitungen in schlagwetterfreien Gruben.

1. Schächte und einfallende Strecken von mehr als 45° Neigung.

192. Leitungen in Schächten. Wahl des Leitungsmaterials.

Für die in diesen Teilen des Bergwerkes zur Verlegung kommenden Leitungen liegen ganz besonders schwierige Verhältnisse vor. Es ist einmal zu berücksichtigen, dass die engen Schächte, welche zumeist für die Förderung in Anspruch genommen werden und in denen alle möglichen Rohrleitungen liegen, eine längere Montage nicht zulassen, dass ferner durch den Betrieb an sich gewisse Gefahren für die Leitungen bestehen und dass schliesslich auch die häufig auftretenden chemischen Bestandteile der Grubenwässer einen einschneidenden Einfluss auf die Wahl des Leitungsmaterials ausüben müssen. Es darf auch nicht vergessen werden, dass die elektrischen Leitungen oft an schwierig zugänglichen Orten liegen und dass infolgedessen nur solches Material verwendet werden kann, welches so wenig wie möglich einer Wartung bedarf.

Alle vorerwähnten Gründe sind dafür massgebend, dass in den hier zunächst in Frage kommenden Teilen der Bergwerke nur Kabel zugelassen werden dürfen, welche eine Armatur aus verzinkten Eisen- oder Stahldrähten besitzen. Aber auch schon durch die später beschriebene Art des Einhängens der Kabel in die Schächte muss diese Armatur gewählt werden, da sie so beschaffen sein muss, dass sie die gesamte Fabrikationslänge des Kabels frei tragen kann.

Die für Bergwerke bestimmten Kabel sind bereits an anderer Stelle besprochen worden, auf die hier verwiesen sei (Hdb. VI, 1, S. 184); ihre Verlegung in Schächte ist in diesem Band unter „Kabelverlegung“ (Hdb. VI, 2, S. 109) behandelt.

Diese Konstruktionen zeigen sämtlich einen Bleimantel über der die Leiter umhüllenden Isolationsschicht, jedoch kann derselbe weggelassen werden, wenn die an seine Stelle tretende Hülle dem Blei an Widerstandsfähigkeit mindestens gleichkommt. Vielfach finden Gummikabel Verwendung.

In verschiedenen Bergwerken üben die Grubenwässer einen starken chemischen Einfluss auf die Kabel und insbesondere auf deren Eisenarmatur aus und ist es daher erforderlich, einen besonderen Schutz zu schaffen, der in der Regel aus einem Anstrich mit Teer bestehen wird. Sollten die chemischen Einflüsse jedoch derart sein, dass ein solcher Anstrich nicht den genügenden Schutz erwarten lässt, so wird das Kabel mit einem zweiten Bleimantel versehen, welcher über der Eisenarmatur angeordnet wird. Da es nun aber beim Umpressen des Kabels mit dem Bleimantel nicht aus-

geschlossen ist, dass kleine fehlerhafte Stellen oder Luftblasen die geschlossene Hülle an irgend einer Stelle unterbrechen, so werden vielfach statt des einen starken Bleimantels bei Grubenkabeln zwei entsprechend schwächere übereinandergelegt.[1])

2. *Horizontale und einfallende Strecken von weniger als 45° Neigung.*

193. Leitungen in Strecken.

Wenn eine Bergwerksanlage mit einer höheren Spannung als 500 Volt betrieben wird, so müssen auch in diesen Teilen des Bergwerkes Kabel verwendet werden, desgleichen auch, wenn die Spannung geringer ist und die Leitungen niedriger verlegt werden als drei Meter von der Sohle. Die Verlegung der Kabel erfolgt in diesem Falle wie gewöhnlich, jedoch ist zu bemerken, dass dieselben nie ungeschützt unmittelbar auf die Sohle verlegt werden dürfen, da sie sonst von den Mannschaften betreten und von vorbeifahrenden Transportwagen beschädigt werden können. Man wird daher ein besonderes Schutzbrett anbringen lassen oder sie durch übergelegte Winkel- oder U-Eisen schützen. Werden sie an den Seitenwänden oder an Firsten befestigt, wobei dieselben Schellen Verwendung finden, wie sie bereits auf Seite 111 dieses Bandes beschrieben worden sind, so dürfen die Befestigungsstellen nicht weiter als 3 m auseinanderliegen.

Indessen wird sich eine feste Verlegung der Kabel auf der Strecke kaum ermöglichen lassen, wenn an den betreffenden Orten infolge starken Gebirgsdruckes Gesteinverschiebungen vorkommen. In solchen Fällen würden die festangeschellten Kabel sicher zerrissen werden. Wir wählen hier eine bewegliche Aufhängung, die am einfachsten dadurch hergestellt wird, dass Holzbohlen mit Hilfe von Drahtseilen beweglich aufgehängt und auf diesen die Kabel verlegt werden. Auch wird in einem derartigen Fall das Kabel nicht genau gerade verlegt, sondern in langgestreckten Schlangenlinien.

Ganz besondere Sorgfalt ist, wenn Kabel in Strecken, hauptsächlich in solchen, welche befahren werden, verlegt werden, auf die Unterbringung etwaiger Verbindungsmuffen zu legen. Dieselben dürfen nicht so weit hervorstehen, dass sie von Transportwagen u. s. w. erfasst werden und ist es allgemein üblich, die Muffen etwas im Gestein zu versenken. Werden die Kabel an der Wand oder am First befestigt, so sind die Muffen sicher zu befestigen, sie dürfen nicht nur in die Kabel eingehängt werden, da sonst die Klemmverbindung auf Zug beansprucht und eventuell auseinandergezogen wird.

Gegen chemische Einflüsse schützt man sich hier auch dadurch, dass asphaltierte Bleikabel verwendet und eventuell nach der Verlegung mit Teer angestrichen werden.

In solchen Strecken, in welchen es möglich ist, die Leitungen in einer Höhe von 3 m über der Sohle zu verlegen, was allerdings selten vorkommt, können im Gebiet der Niederspannungsvorschriften, wenn also keine Leitung eine höhere Spannung als 250 Volt gegen Erde annehmen kann, isolierte Leitungen verwendet werden, wenn ihre Isolierung aus einer wasserdichten, vulkanisierten Gummihülle besteht, welche derart beschaffen ist, dass sie

---

1) Über den Wert des doppelten Bleimantels ist an anderer Stelle bereits das Nähere angegeben (Hdb. VI, 1, S. 182).

nach 24 stündigem Liegen im Wasser der halbstündigen Einwirkung eines Wechselstroms von 2000 Volt zwischen Kupferseele und Wasser widersteht.

Beträgt die Spannung weniger als 125 Volt, so kann die Leitung in jeder beliebigen Höhe verlegt werden, muss jedoch, da bei der Berührung von Leitungen, welche mit diesen geringen Spannungen arbeiten, Gefahren für den Menschen immerhin nicht ausgeschlossen erscheinen, genügend geschützt werden. Entweder erfolgt dann die Verlegung auf Isolatoren, die durch Schalbretter verkleidet werden, oder die Leitungen werden in Rohr verlegt, dessen Eisenmantel geerdet wird.

Alle isolierten Leitungen werden auf Isolatoren verlegt, und zwar sind die folgenden Abstände zwischen den Leitungen innezuhalten: bei Spannweiten von mehr als 6 m mindestens 20 cm, bei Spannweiten von 4—6 m mindestens 15 cm, bei Spannweiten von 2—4 m mindestens 10 cm und bei solchen von höchstens 1 m mindestens 5 cm.

Alle Isolatorenträger werden mit Cement im Gestein befestigt; wenn Schachtzimmerung vorhanden ist, können sie mit Holzschrauben befestigt werden. Auf den Isolatoren werden die Leitungen mit verzinntem Kupferbindedraht abgebunden, die entsprechenden Stellen der Leitungen jedoch vorher mit Isolierband umwickelt, damit der Bindedraht nicht in die Isolierung einschneiden kann. Wo chemische Einflüsse befürchten lassen, dass metallener Bindedraht nicht hält, wird geteerte Hanfschnur verwendet.

Sind die Leitungen fertig verlegt, so müssen sie mit einem Anstrich versehen werden, welcher durch die in der Grube herrschende feuchte Luft nicht angegriffen wird und imstande ist, die Isolierung gegen chemische Einflüsse zu schützen.

Dieser Anstrich ist aber ziemlich schwierig herzustellen, da einmal viele Farben auf der fettigen Leitung sehr schlecht haften, die Leitung auch während und nach der Verlegung sofort beschlägt, wodurch das Haften der Farbe sehr behindert wird. Man muss daher die Leitungen sehr gut trocken reiben, nur ganz kurze Stücke nacheinander streichen und den Befestigungsstellen ganz besondere Sorgfalt widmen. Da der Anstrich auf die Dauer nicht hält, so muss er mindestens alljährlich wiederholt werden.

Ausser der Verlegung auf Isolatoren können auch Rohre überaus vorteilhaft verwendet werden; sie sind jedoch nur zulässig bis zu Spannungen von 250 Volt gegen Erde. Die Rohre müssen einen Stahl- oder Eisenmantel besitzen, welcher an den Stossstellen leitend zu verbinden ist. Aus diesem Grunde sind, soweit es sich um trockene Stellen handelt, die auf Seite 270 u. ff. dieses Bandes beschriebenen PESCHELschen Stahlrohre besonders bequem. In feuchten Räumen jedoch, wo durch den Schlitz Wasser in das Innere eindringen kann, verwende man Stahlpanzerrohre von BERGMANN, deren Stossstellen gut abzudichten sind.

Das Abdichten, welches in der Regel mit Hanf und Mennige erfolgt, hat nun allerdings den Nachteil, dass die leitende Verbindung an den Stossstellen unterbrochen wird, so dass es erforderlich ist, in diesem Fall eine besondere elektrisch leitende Brücke von Rohr zu Rohr herzustellen.

In allen Fällen, wo es möglich ist, das Rohrsystem zu erden, wird man dies thun, und zwar an möglichst vielen Stellen.

Blanke Leitungen dürfen nur verwendet werden, wenn sie betriebsmässig geerdet sind und als Fahrleitung für elektrische Bahnen. Da in der Regel aber die Strecken so niedrig sind, dass die an der Decke befestigten blanken

Arbeitsleitungen der Grubenbahn, sei es von der Sohle, sei es von den Grubenwagen aus, von der Mannschaft berührt werden können, so sind die Drähte der zufälligen Berührung zu entziehen, und zwar geschieht dies am bequemsten, indem man von beiden Seiten Hölzer derart anordnet, dass wohl der Kontaktarm zwischen ihnen durchgleiten kann, dass jedoch eine Berührung seitens der Mannschaft nur dann erfolgen kann, wenn sie beabsichtigt wird.

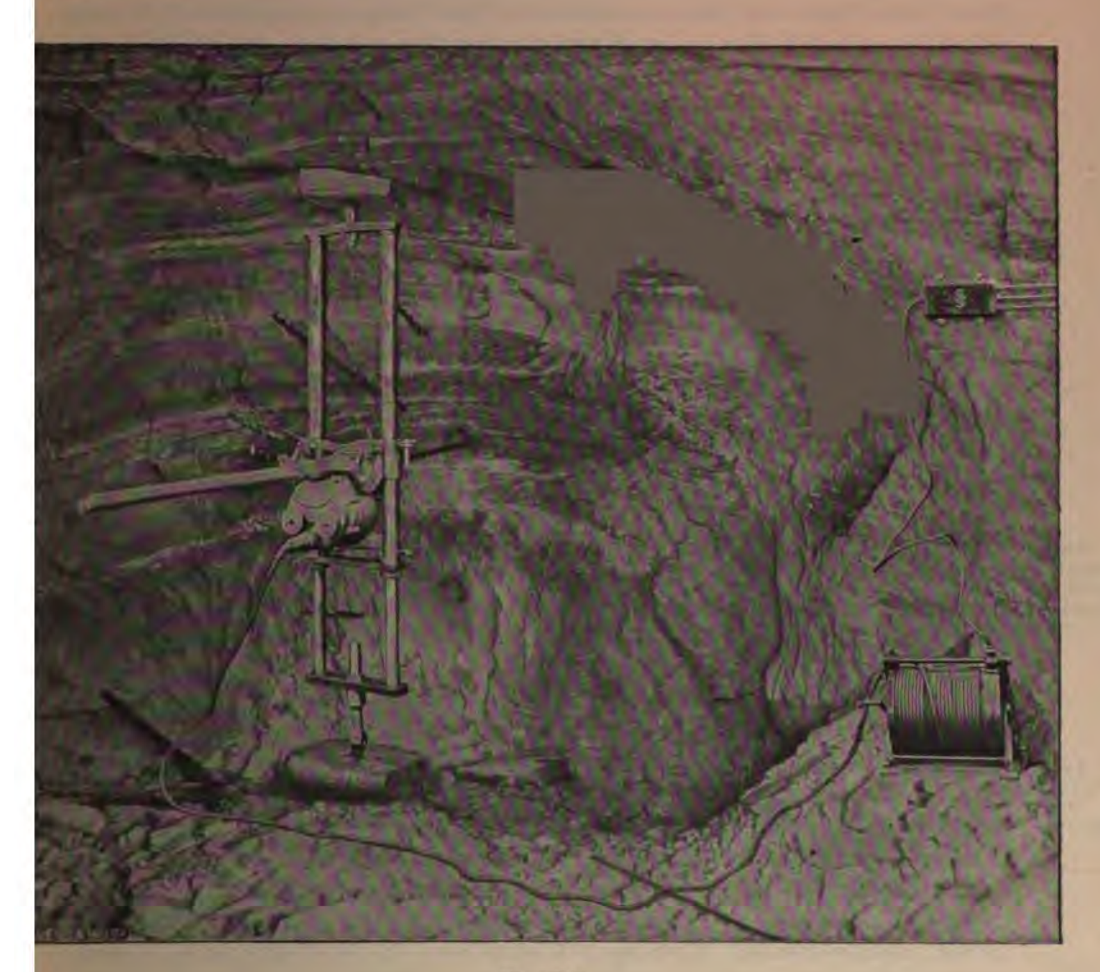


Fig. 346.

Zum Anschluss von transportablen elektrischen Apparaten, Motoren, elektrisch betriebenen Bohrmaschinen sind biegsame Leitungen erforderlich und bei Spannungen bis zu 500 Volt zwischen zwei Leitungen gestattet, sofern sie mit einer dichten Metallumklöppelung versehen sind. Da diese Leitungen aber häufig in ganz verschiedenen Längen gebraucht werden, so werden sie, wie dies Fig. 346 zeigt, auf Trommeln aufgewickelt, von welchen sie je nach Bedarf abgerollt werden. Der Durchmesser dieser Trommeln ist, damit die äussere metallene Schutzschicht durch zu häufiges scharfes Biegen nicht brüchig wird, so gross wie möglich zu wählen.

Leitungen in Schlagwettergruben.

194. Isolierte und blanke Leitungen.

Genau die gleichen Bestimmungen, die wir für die Verlegung in schlagwetterfreien Gruben erwähnten, haben für solche Anlagen Geltung, welche in Schlagwettergruben installiert werden, jedoch ist es nicht zulässig, isolierte Drahtleitungen offen zu verlegen; dieselben müssen vielmehr durch geerdete Eisen- oder Stahlrohre gegen mechanische Beschädigungen geschützt werden. Im übrigen sind Kabel zu verwenden, deren Verlegung in der gleichen Art zu erfolgen hat, wie vorher beschrieben.

Blanke Leitungen können nur, wenn betriebsmässig geerdet, Verwendung finden; als Fahrdrähte für elektrische Bahnen sind sie unzulässig, da es zur Zeit noch keine Stromabnahmevorrichtung giebt, welche funkenlos arbeitet, so dass beim Bahnbetrieb die Möglichkeit einer Entzündung von Schlagwettern zu nahe liegt. Indessen sind die Bestrebungen der Elektrotechniker und der Bergleute darauf gerichtet, funkensichere Stromabnahmevorrichtungen zu konstruieren, um dem elektrischen Bahnbetrieb auch in Schlagwettergruben Eingang zu verschaffen. Die bisherigen Konstruktionen leiden jedoch an grosser Umständlichkeit, ohne Gewähr für sicheres Funktionieren zu bieten.

Die Verlegung von Leitungen auf Schiffen.

195. Beginn der Leitungsverlegung.

Mit der Verlegung der Leitungen wird in der Regel sofort nach dem Stapellauf des Schiffes begonnen, da der Umfang der Arbeiten ein sehr grosser zu sein pflegt und nur so die elektrische Anlage rechtzeitig mit der übrigen Einrichtung des Schiffes fertig werden kann. Es sind zunächst die Wege für die Hauptleitungen festzulegen, wobei darauf zu achten ist, dass die Leitungen möglichst hoch liegen müssen, um sie vor mechanischen Beschädigungen zu schützen.

196. Anordnung der Leitungen.

Die Leitungen werden als Hin- und Rückleitungen getrennt verlegt, nur in der Nähe der Kompasse, denen man sich übrigens nicht mehr als auf 1 m Entfernung nähern soll, werden die Kabel ganz dicht zusammengelegt, eventuell konzentrische Kabel verwendet. Früher war es allgemein üblich, den Schiffskörper als Rückleitung zu verwenden, jedoch musste man bald davon Abstand nehmen, da Kurz- und Schiffsschlüsse häufig eintraten, auch infolge elektrolytischer Wirkungen Korrosionen am Schiffskörper beobachtet wurden. Neuerdings verwendet man allerdings für Torpedoboote den Schiffskörper bisweilen wiederum als Rückleitung, und zwar ist hier die Gewichtsersparung ausschlaggebend.

197. Leitungsmaterial bei Schiffsmontagen.

Ursprünglich wurde für Schiffsmontagen einfaches Gummikabel verwendet, welches in Holzleisten verlegt wurde. Die Nachteile, welche diese Verlegungsart jedoch bot, waren genau die gleichen wie bei den Landanlagen, die auf Seite 257 dieses Bandes beschrieben sind. Hierzu kommt aber noch bei Kriegsschiffen die Gefahr, dass beim Einschlagen von Geschossen die Holzleisten zersplittern und zu gefährlichen Verletzungen führen können. Später wurden für alle Räume, in denen die Leitungen besonderen mechanischen Verletzungen ausgesetzt sind, eisenarmierte Bleikabel verwendet, während in den mit Holz ausgekleideten Kammern die Verlegung mit Holzleisten bei-

behalten wurde und zur Zeit auch noch angewendet wird. Nur bei den neuesten Schiffen ist die Verwendung von Holz auch als Auskleidung von Kammern vermieden und werden, abweichend von den am Land üblichen Installationen, die Gummiaderleitungen direkt auf das Eisen verlegt, wenn nicht auch hier armierte Kabel Verwendung finden. Dieser Verlegungsart entsprechend wird allerdings die Gummihülle ziemlich stark gewählt.

Die Kabel bestehen aus verzinntem Kupferdraht, über welchen Gummi nahtlos gepresst ist. Hierauf folgt eine Lage gummierten Bandes und dann eine starke Umspinnung aus imprägniertem Hanf oder Baumwolle. Die Imprägnierung muss derart sein, dass sie einer feuchten Wärme von 60° C. dauernd Widerstand leisten kann. Die Konstruktion der asphaltierten Bleikabel ist genau die gleiche wie die der vorbeschriebenen Leitungen, nur wird über der äusseren Umspinnung noch ein starker Bleimantel aufgepresst, der durch eine asphaltierte Umhüllung geschützt wird. Soll dieses Kabel armiert werden, so wird über den Bleimantel eine imprägnierte Umspinnung und darüber eine Armatur aus doppelten Eisen- oder Stahlbändern oder auch aus rundem oder profiliertem Draht und darüber eine asphaltierte Umhüllung gelegt. Auch die Verwendung von Leitungen, bei denen an Stelle der Armatur eine Umklöppelung aus schwerrostendem Metall tritt, ist zulässig.

198. Art der Verlegung.

Für die Verlegung der Leitungen an Bord von Schiffen, insbesondere von Kriegsschiffen, sind die mannigfaltigsten Rücksichten zu nehmen und würde es uns sicher zu weit führen, wenn wir hier alle die Einzelheiten aufführen wollten, welche bei Arbeiten auf diesem Spezialgebiet beachtet werden müssen. Es sei nur soviel erwähnt, dass alle Hauptleitungen als Ringleitungen ausgebildet werden. Die wichtigsten Leitungen liegen unterhalb des Panzerdecks und soweit von hier aus Leitungen nach Räumen über Panzerdeck geführt werden müssen, können nur vorhandene Öffnungen, Ventilationsschächte u. s. w. verwendet werden, das Panzerdeck darf nicht durchbohrt werden. Dagegen dürfen Treppen u. s. w. zur Verlegung von Leitungen nicht benutzt werden.

Bei Schiffsmontagen lassen sich viele Installationsartikel, wie Schellen und dergl., nur während der Montage herstellen, da dieselben den jeweiligen Verhältnissen entsprechend ausgeführt werden müssen. Sind daher die Leitungswege festgestellt, so werden zunächst die Löcher für die Kabelschellen, Schottstopfbuchsen, Decksdurchgänge angezeichnet und gebohrt, während in der Werkstatt am Montageplatz die nötigen Kabelschellen, Blechunterlagen und Decksdurchgänge angefertigt werden.

Kabelverlegung.

199. Befestigungsmaterial.

Die **Befestigungsschrauben** für die Kabelschellen und Apparate sollen aus Bronze oder Messing bestehen und müssen vollständig bis an den Kopf ausgeschnitten sein. Die Schraubenlöcher erhalten ebenfalls Gewinde, so dass die Schrauben als Stiftschrauben dienen; sie sind bei wasserdichten Schotten sauber zu verpacken, da bei den Druckproben der einzelnen Räume an diesen Stellen kein Wasser durchtreten darf. Die Länge der Schrauben ist unbedingt so zu wählen, dass der Bolzen mit der Mutter abschneidet. Die gangbarsten Längen sind 10, 15 und 20 mm, die Stärke beträgt $^1/_4$". Für Befestigungen von Kabeln, Lampen, Schaltern u. s. w. an den Decks

werden von oben Schrauben mit versenkten Köpfen eingezogen. Da die Decks meistens mit Linoleum belegt werden, so ist im Laufe der Montage peinlichst darauf zu achten, dass diese Befestigungsschrauben **sämtlich** vor dem Belegen der Decks eingezogen werden. Die Linoleumleger müssen bei ihren Bohrarbeiten scharf kontrolliert werden, damit sie nicht unter den Decks liegende Leitungen anbohren.

Die Schellen für die Kammern werden aus Messing, die für alle übrigen Räume aus verzinktem Bandeisen hergestellt. Zur Herstellung der gebräuchlichsten Schellen für Kabel von gleichem Durchmesser werden entsprechende Gesenke angefertigt und die Schellen mit einer Presse gebogen und gelocht. Die Schellen für Kabel von verschiedenen Durchmessern müssen von Hand — am besten unter Benutzung kurzer entsprechender Kabelproben — hergestellt werden.

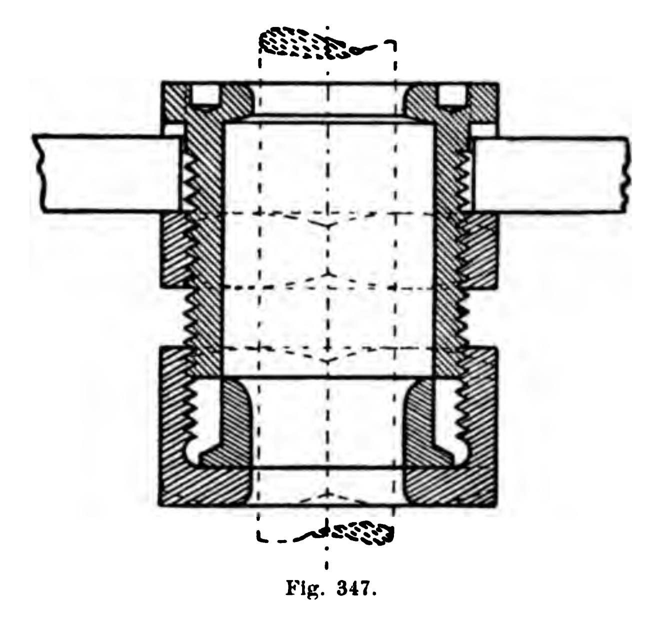


Fig. 347.

Für die Messingschellen der Einzellampenleitungen in den Kammern genügt eine Befestigungsschraube. In allen anderen Räumen dagegen sollen die Schellen für zwei Leitungen — wenn sie nicht ausserordentlich gut geschützt liegen — stets zwei Schrauben erhalten.

200. Kabelschutz.

An Stellen, wo die Kabel über hervorstehende Teile (Winkeleisen und dergl.) geführt werden, müssen Bleche gelegt werden, die örtliche Eindrücke verhindern. Folgen solche Teile in kürzeren Zwischenräumen aufeinander, z. B. Spanten, und dürfen diese aus schiffsbautechnischen Gründen nicht durchbohrt werden, so wird ein durchgehendes Blech gelegt, das zur Versteifung am Rande umgebördelt wird, dessen Querschnitt also U-förmig ist.

In den Salons, Wohnräumen und Messen können die Kabel, soweit möglich, unter die Blechverkleidungen der Decksbalken gelegt werden. Die freiliegenden Kabel müssen mit der betreffenden Tapeten- bezw. Deckenfarbe gestrichen werden. Zu diesem Zweck müssen die Kabel, soweit sie auf Tapete liegen, etwas von der Wand zurückgenommen werden. Dem Streichen hat ein mehrmaliges Grundieren mit einer Mischung aus Zinkweiss, Terpentin und Leinöl voraufzugehen.

An den Stellen, wo die Kabel durch wasserdichte Schotten oder durch ein Deck geführt werden, müssen sie gut abgedichtet werden. Bei der Durchführung durch Schotte benutzt man Schottstopfbuchsen (Fig. 347).



Fig. 348.

Die Abdichtung gegen die Schottwand geschieht mittels einer Gummischeibe bezw. Hanf mit Mennige, die Abdichtung gegen das Kabel mittels Rundgummi.

An den Durchführungsstellen durch nicht wasserdichte Schottwände müssen Hülsen über die Kabel geschoben werden, welche den Zweck haben, die Kabel gegen örtliche Eindrücke bezw. Zerschneiden zu schützen, sie müssen gegen Lagenveränderungen gesichert werden. Diese Hülsen können aus Weissblech hergestellt werden. Zur Verhinderung der Lagenveränderung werden kleine Zähnchen eingeschnitten und diese zu beiden Seiten der Durchführungsstelle aufgebogen.

201. Decks-durch-führungen.

Für die Durchführung durch die Decks werden Decksdurchführungen nach Fig. 348 (Nachtsignalapparat auf S. M. S. „Kaiser Barbarossa") hergestellt. Hierzu sollen, soweit es sich um Schiffe der Kaiserlichen Marine handelt, Kupfer- oder Gasrohre verwendet werden. Jedoch wird man am besten dünnwandiges Mannesmannrohr nehmen, das einerseits billiger als Kupfer, andererseits leichter als Gasrohr ist. Die Durchführungen werden mit Flanschen am Deck befestigt, welche mit den Rohren hart verlötet sind. Sie werden verpackt und mit $^3/_8$"-Schrauben, die mit Gewinde von unten in das Deck eingezogen und gut abgedichtet werden, festgeschraubt und dann verstemmt. Beim Panzerdeck müssen diese Schrauben von oben eingeschraubt werden.

Zum Abdichten der Kabel in den Rohren wird in den oberen Teil, und zwar höchstens 8—10 cm tief, eine Mischung aus einem Teil Kabelfüllmasse und zwei Teilen Kolophonium gegossen. Um die Masse nur bis zu der bestimmten Tiefe eindringen zu lassen, wird Werg oder dergl. in die Rohre gestopft und darauf etwas Sand gegeben. Vor dem Vergiessen müssen die Rohre angewärmt und die Masse gut dünnflüssig sein, damit sie gut abdichtet.

Die Durchführungsrohre sind mit einer Schelle an der Schottwand zu befestigen.

Es ist darauf zu achten, dass die Rohre weit genug sind, so dass sie ein möglichst leichtes Durchziehen der Kabel gestatten. Zur Durchführung des biegsamen Kabels für die Bug- bezw. Ankerlaterne und für die Hecklaterne werden in das Ober- bezw. Batteriedeck verschliessbare Decksdurchführungen eingelassen.

202. Kabel-verlegung.

Allgemein sind bei der Kabelverlegung noch folgende Punkte zu beachten:

Hin- und Rückleitung ist, wenn irgend möglich, unter eine Schelle zu legen. Es dürfen mehrere Stromkreise unter eine Schelle gelegt werden, sofern hierdurch die solide Befestigung der Kabel nicht leidet. Welche Menge von Kabeln an dem Hauptverteilungspunkt zusammenlaufen, zeigt Fig. 349, aus welcher auch ersichtlich, in welcher Weise die Kabel übereinander gelegt werden, wenn grössere Leitungsbündel zusammengefasst werden müssen.

An Stellen, wo mechanische Verletzungen zu befürchten sind, müssen die Kabel verkleidet werden. Die Verkleidungen sind aus Blech herzustellen und diese Schutzbleche mit Schrauben zu befestigen, so dass sie leicht abnehmbar sind.

Auf eine möglichst starke Befestigung der Kabel achte man in den Gängen und Mannschaftsräumen, welche als Schlafräume benutzt werden.

Durch Zündungsspinde dürfen Leitungen überhaupt nicht, durch Kohlenbunker, Lasten und Munitionsräume nur in den dringendsten Fällen geführt werden. Leitungen in den Kohlenbunkern müssen unter allen Umständen eine Verkleidung aus starkem Eisenblech erhalten.

203. Ab-zweigungen.

Abzweigungen von Leitungen dürfen nur in Abzweig- bezw. Sicherungskästen hergestellt werden. Es ist an Bord von Kriegsschiffen unzulässig, kürzere Kabel miteinander zu verbinden; es dürfen vielmehr nur ganze Längen Verwendung finden.

Die Kabel müssen möglichst von unten oder von der Seite in die Armaturen eingeführt werden. Die Einführungen von oben sind noch mit Compoundmasse abzudichten.

Selbst bei seitlicher Einführung empfiehlt es sich, die Kabel etwas tiefer als die Einführung zu legen.

Für die Abzweige, sei es zu den Motoren oder den Lampen, dienen Abzweigkästen (Fig. 350 u. 351).

Die Motor- bezw. Ringleitungsabzweigkästen erhalten entsprechende Aufschriften, aus denen die Bestimmung der abzweigenden Leitung und der zu

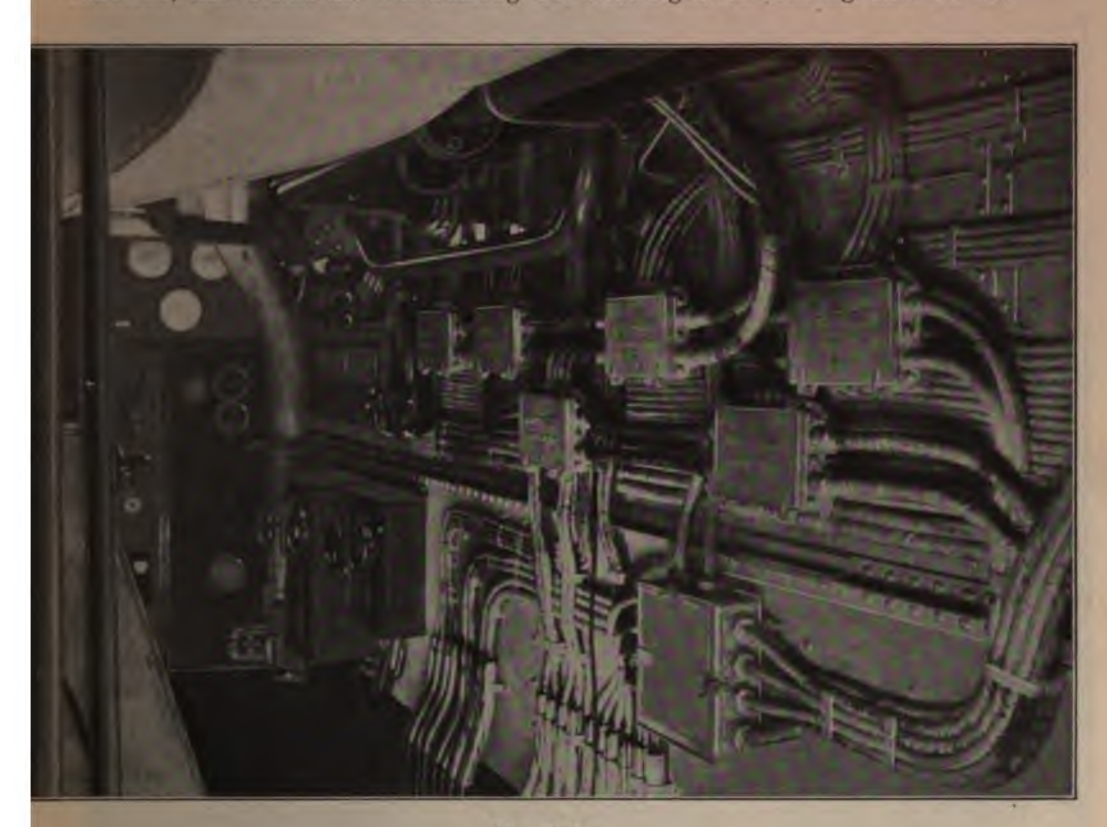


Fig. 349.

sichernde Querschnitt ersichtlich ist. Die Aufschrift kann aufgeschlagen oder mit Farbe aufgeschrieben werden.

Um sofort erkennen zu können, ob ein Kasten Sicherungen für Ventilatoren, Munitionsaufzüge oder dergl. enthält, werden die Kästen verschiedenfarbig gestrichen.

Auf die Lampenabzweigkästen werden die Nummern der abgezweigten Lampen aufgeschlagen.

Die Abzweigkästen für die Munitionsaufzüge und Schwenkwerke müssen in möglichster Nähe von den Motoren angebracht werden. Dasselbe gilt von den zu den Motoren gehörenden Schalterkästen (Fig. 350, Kohlenaufzugswinden mit Schaltkasten und Anlassern).

Die asphaltierten Kabel erhalten einen doppelten Grundanstrich von Schellack mit Spiritus, die Gummikabel einen solchen aus Zinkweiss mit



Fig. 350.

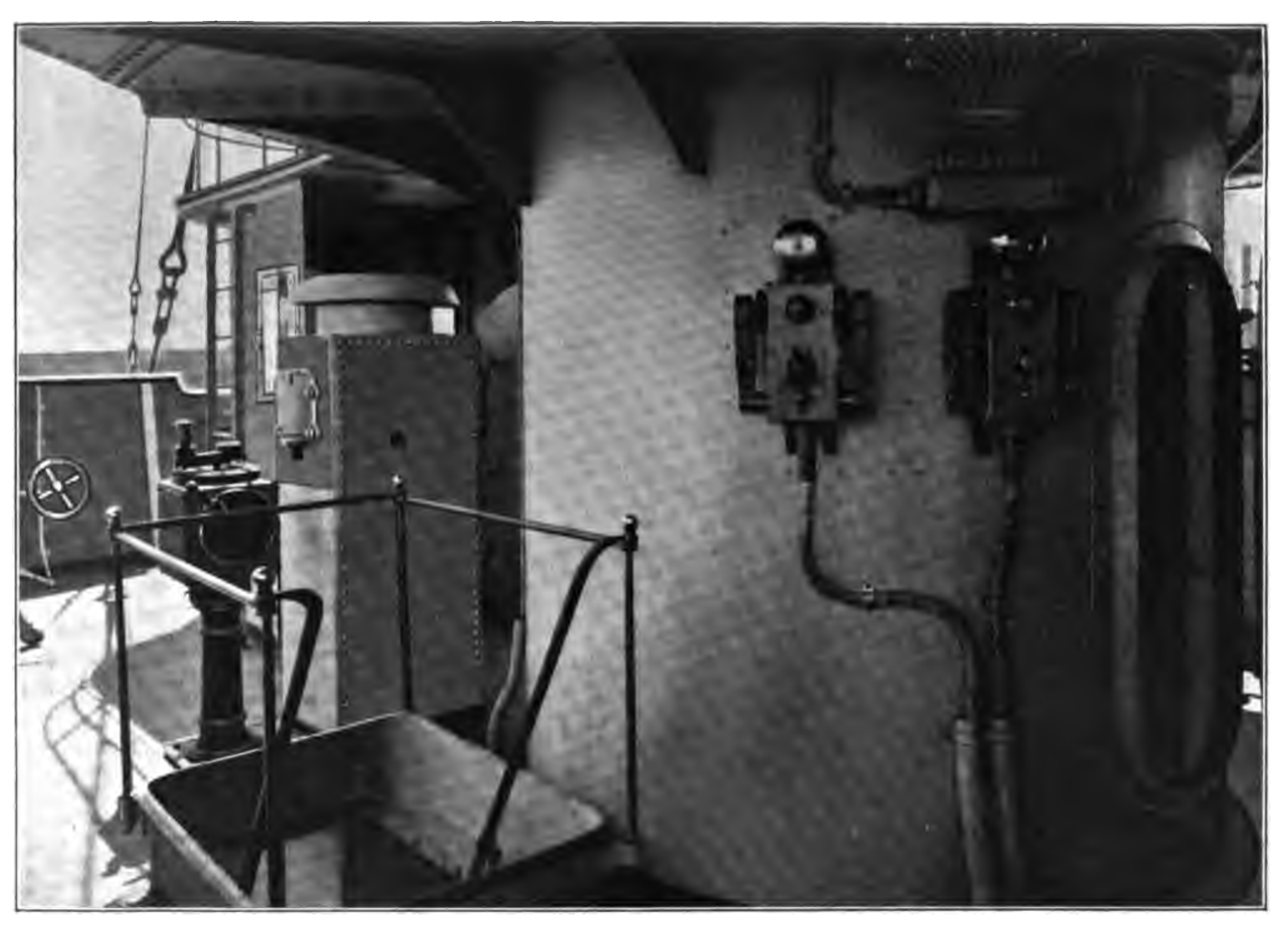


Fig. 351.



Fig. 350.

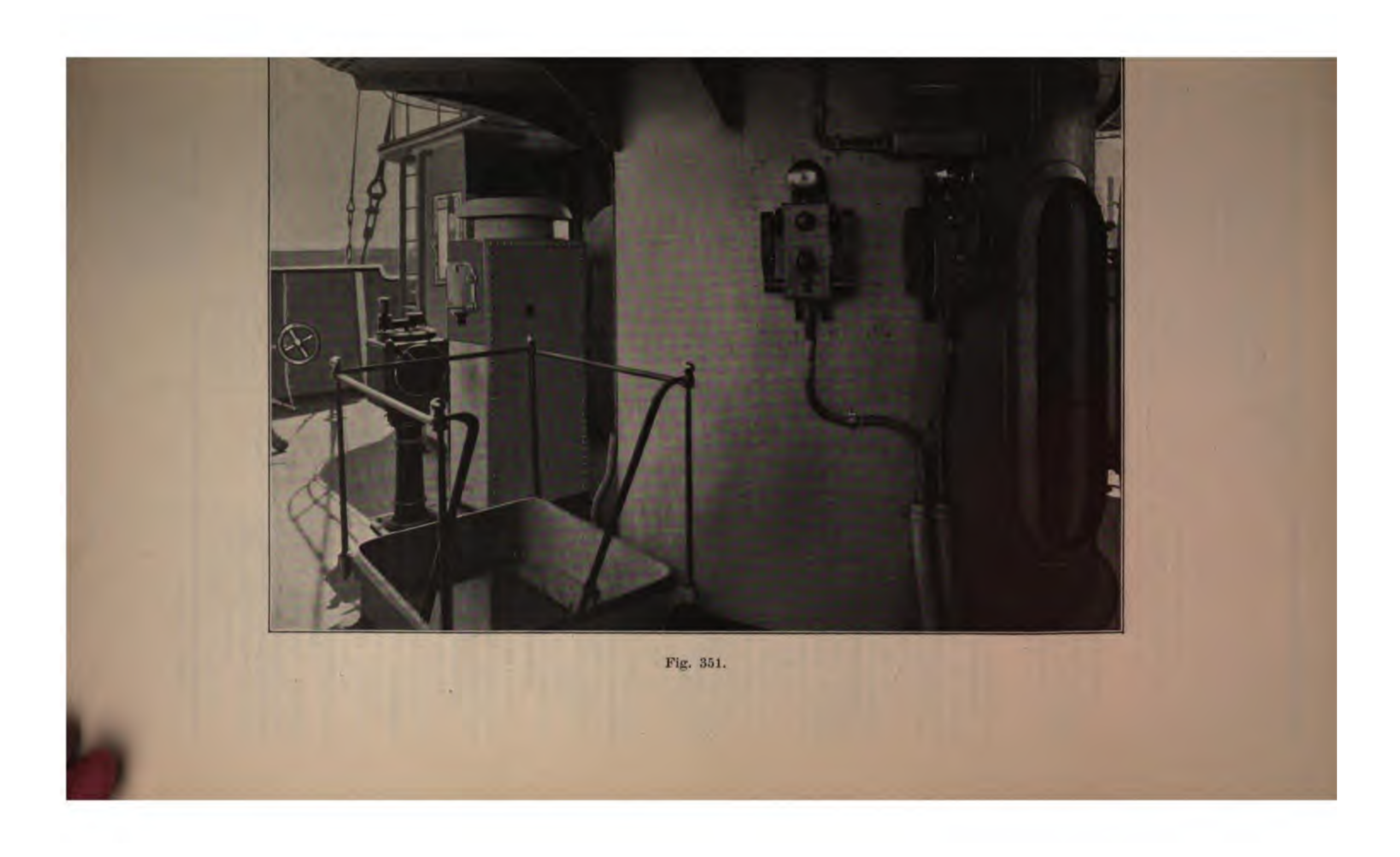


Fig. 351.

	Trockene Räume ohne leicht entzündlichen Inhalt § 38	Feuergefährliche Betriebsstätten § 39	Chemische (bedingt explosionsgefährliche) Betriebsstätten u. Lagerräume § 47	Explosionsgefährliche Betriebsstätten u. Lagerräume § 40	Feuchte Räu[me] § 41
Zulässige maximale Spannung für den betreffenden Raum	Im allgemeinen unbeschränkt; in Wohnräumen 600 Volt § 38 b (Hochsp.).	1000 Volt § 39 (Hochsp.).	1000 Volt	Niederspannung	Unbeschränk[t]
Blanke Leitungen BC. Zulässige Spannung: In Betriebsräumen und im Freien unbeschränkt. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 2 u. 159.	Als betriebsmässig geerdete Leiter mit Krampen oder Schellen, sonst auf Isolierglocken (Fig. 160) oder Isolatoren nach Fig. 274. Ausserhalb elektr. Betriebsräume nur f. Niedersp. oder als Kontaktleitung bis 1000 Volt. § 28 b (Hochsp.). In bewohnten Räumen nur als geerdeter Leiter erlaubt. § 38 a.	Nur als geerdeter Leiter erlaubt. § 39 d.	Verboten. § 47 b.	Verboten. § 40 c.	Zulässig bis 2.. V auf Isolatoren [...] als geerdete Le[iter] Abstand von d[er] Wand! § 41 [...] Anstrich
Gummibandleitungen GB. Zulässig für feste Verlegung in trockenen Räumen bis 250 Volt, zum Anschluss beweglich. Stromverbraucher unzulässig. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 159.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 261), auf Klemmen (Fig. 270); in Isolierrohre vgl. Hdb. VI, 2, S. 257 u. ff.	In Isolierrohren. § 39 d.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 261). In Isolierrohren, wenn die chemischen Substanzen die offen verlegten Leitungen angreifen. § 47 b. Schutz gegen chem. Einflüsse.	Verboten. § 40 d.	Verbote[n] § 41 c
Gummiaderleitungen GA. Zulässige Spannung festverlegt 1000 Volt, zum Anschluss beweglicher Stromverbraucher 500 Volt. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 161.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 261), auf Klemmen (Fig. 270). In Isolierrohre jeder Art und in Metallrohre ohne isolierende Auskleidung; bei Hochspannung §§ 17 u. 29 b beachten.	In Rohren jeder Art. § 39 d. Für Hochspannung mit Metallmantel; vergl. Weber, Erläuterungen.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 261). In Rohre jeder Art, wenn die chem. Substanzen die offen verlegten Leitungen angreifen. § 47 b. Schutz gegen chem. Einflüsse.	In Rohren jeder Art. § 40 d.	Auf Rollen (Fig. 26[1]) 250 Volt, auf Is[olatoren] (Fig. 160) bis 2.. V Für Hochspannung Wandabstände [...] so gross. In wid[erstands]fähigen Rohren. § 41 c.
Gummiaderleitungen für Hochspannung SGA. Zulässig für 5000 bezw. 12000 Volt, § 7 d, wenn fest verlegt, zum Anschluss bewegl. Stromverbraucher bis 1500 Volt. § 7 h mit Schutzschlauch. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 167.	Wie Gummiaderleitungen.	Wie Gummiaderleitungen.	Wie für Gummiaderleitungen GA., jedoch nur bis 1000 Volt. § 47 g (Hochsp.).	In Rohren jeder Art. § 40 d.	Nur bis 1000 Vo[lt] zulässig Verlegung wie Gummiaderleitun[gen] GA. § 41 b
Biegsame Mehrfachleitungen zum Anschluss beweglicher Stromverbraucher. SA bis 500 Volt, MA bis 500 Volt, SMA bis 1500 Volt.	Zulässig.	Für Niederspannung zulässig. § 39 e.	Zulässig bis 1000 Volt. § 47 b, g.	Verboten. § 40 c.	Zulässig mit star[ker] schmiegsamer U[m]hüllung zum mech[a]nischen Schutz f[ür] Niederspannung § 41 b und [...]
Schnurleitungen. Gummibandschnur SB. Fest verlegt zulässig bis 125 Volt, zum Anschluss beweglich. Stromverbraucher unzulässig. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 169.	Nur über Putz zulässig auf Rollen (Fig. 260, 273 c), Klemmen (Fig. 272), Ringen (Fig. 271), in Isolierrohren. § 38 d.	Unzulässig.	Verboten. § 47 b.	Verboten. § 40 c.	Verboten. § 41 c
Gummiaderschnur SA. Zulässig bis 1000 Volt festverlegt. „ „ 500 „ z. Anschluss beweglicher Stromverbraucher. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 170.	Auf Rollen (Fig. 261, 273 c), Ringen (Fig. 271), Klemmen (Fig. 272), in Rohren jeder Art.	Nur für Niederspannung und nur als bewegliche Leitung zulässig. § 39 e.	In Räumen mit ätzenden Dünsten, fest verlegt, verboten. Als bewegl. Leitung mit besonderem Schutz auch in diesen Räumen zulässig. § 47 i.	Verboten. § 40 c.	Nur zulässig als [be]weglicher Leit[ung mit] starker schmieg[samer] Umhüllung zum mechanisch[en] Schutz. § 41 [...]
Kabel. Zulässige Spannungen: einfache Gleichstromkabel normalisiert 700 Volt, konzentrische Kabel 3000 Volt, verseilte Kabel unbeschränkt. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 171 u. ff.	In jeder Verlegungsart.	In jeder Verlegungsart.	In jeder Verlegungsart. Schutz gegen chem. Einflüsse.	In jeder Verlegungsart.	In jeder Verlegungsart. Schutz gegen Alkalien
Bemerkungen.			Feuergefährliche, explosionsgefährliche feuchte und durchtränkte Räume chem. Fabriken sind nach den diesbezügl. §§ zu behandeln.		Schutz g[egen] Berührung Die nach [...] Räumen führ[enden] Leitungen [...] abschaltbar [...]

Tabelle.

Räume t ätzenden Dünsten 2 bezw. 47	Durchtränkte Räume § 43	Theater Bühnenhaus § 45	Bergwerke § 46			
			Schlagwetterfreie Gruben		Schlagwetter-Gruben	
			Schächte u. einfallende Strecken von mehr als 45° Neigung	Horizontale u. einfallende Strecken von weniger als 45° Neigung	Schächte u. einfallende Strecken von mehr als 45° Neigung	Horizontale u. einfallende Strecken von weniger als 45° Neigung
000 Volt	Niederspannung	Niederspannung	Im allgemeinen unbeschränkt. Für Beleuchtung gelten gewisse Beschränkungen z. B. durch einige Bergpolizeivorschriften; Spannungsgrenze 250 Volt.			
ig bis 250 Volt Isolatoren mit itzendem Anstrich.	Zulässig auf Isolatoren (Schutz gegen Berührung) und als geerdeter Leiter. Vgl. § 43a und 41b.	Als geerdeter Leiter und im Inneren der Beleuchtungskörper zulässig. § 45c und § 45m[4].	Unzulässig.	Nur als Fahrdraht für elektrische Bahnen und als geerdeter Leiter. § 46b.	Unzulässig.	Nur als betriebsmässig geerdeter Leiter zulässig, nicht als Fahrdraht.
latoren (Fig. 160), ollen (Fig. 264). lierrohren, wenn chemischen Sub- die offen ver- Leitungen an- § 47b. Schutz chem. Einflüsse.	Verboten. § 41c.	In Isolierrohren mit Metallüberzug. § 45d.	Unzulässig.	Unzulässig. § 46c.	Unzulässig.	Unzulässig.
latoren (Fig. 160), ollen (Fig. 264), ohre jeder Art, die chemischen nzen offen ver- itungen angrei- chutz gegen che- che Einflüsse.	Auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 264). In widerstandsfähige Rohre. § 41c.	In Rohren jeder Art. § 45d.	Unzulässig.	Zulässig f. Niederspannung a. Isolatoren m. gewissen Beschränkungen bez. der Aufhängehöhe über d. Sohle. Anstrich od. Verlegung in leitend verbundene möglichst geerdete Eisen- u. Stahlrohre. § 46c.	Unzulässig.	Nur zulässig in leitend verbundenen möglichst geerdeten Eisen- und Stahlrohren und nur für Niederspannung.
ir Gummiader- gen GA., jedoch bis 1000 Volt.	Nur für Niederspannung zulässig auf Isolatoren (Fig. 160), auf Rollen (Fig. 264) in widerstandsfähigen Rohren.	In Rohren jeder Art. § 45d.	Unzulässig.	Zulässig für Niederspannung auf Isolatoren mit gewissen Beschränkungen bez. der Aufhängehöhe über der Sohle. Anstrich oder Verlegung in leitend verbundene möglichst geerdete Eisen- und Stahlrohre. § 46.	Unzulässig.	Nur zulässig in leitend verbundenen möglichst geerdeten Eisen- und Stahlrohren und nur für Niederspannung.
Zulässig Schutzhülle.	Zulässig mit starker schmiegsamer Umhüllung zum mechanischen Schutz. §§ 43a u. 41d.	Zulässig mit starker schmiegsamer, nicht metallischer Umhüllung zum mechanischen Schutz. § 45e.	Nur für Ablaufzwecke zulässig bis 500 Volt.	Nur zulässig bis 500 Volt und nur dann, wenn gepanzert. Vgl. Hdb. VI, 1, S. 169.	Nur für Abtäufzwecke zulässig bis 500 Volt.	Nur zulässig bis 500 Volt und nur dann, wenn gepanzert.
erboten.	Verboten. § 41c.	In Isolierrohren mit Metallüberzug zulässig über Putz. § 45d.	Unzulässig.	Unzulässig.	Unzulässig.	Unzulässig.
rlegt verboten. Anschluss be- Stromverbrau- it schützender le gestattet. § 47i.	Nur zulässig als beweglicher Leiter mit starker schmiegsamer Umhüllung zum mechanischen Schutz. § 41d.	In Rohren jeder Art.	Unzulässig.	Unzulässig.	Unzulässig.	Unzulässig.
r Verlegungsart. utz gegen ische Einflüsse.	In jeder Verlegungsart. Schutz gegen Alkalien.	In jeder Verlegungsart.	Zulässig m. Armatur aus verzinkten Eisen oder Stahldrähten mit event. Schutz gegen chemische Beeinflussungen. Befestigung mit Holzschellen.	Zulässig; bez. der Befestigung siehe § 46d.	Zulässig m. Armatur aus verzinkten Eisen- oder Stahldrähten mit event. Schutz gegen chemische Beeinflussungen. Befestigung mit Holzschellen.	Zulässig; bez. der Befestigung siehe § 46d.
der Leitun- d Rohre gegen che Einflüsse ere beachten.	Schutz gegen Berührung. Warnungstafeln. § 43b.					

Leinöl und Terpentin. Die blanken, stromführenden Teile, mit Ausnahme der Sammel- und Verbindungsschienen an den Schaltbrettern, dürfen nicht gestrichen werden.

Um die einzelnen Stromkreise leicht verfolgen zu können, erhalten die Kabel an den Stellen, wo sie durch Schotte geführt oder hinter Verkleidungen u. s. w. verschwinden, kleine, runde, in der Mitte gelochte Messingschildchen von etwa 30 mm Durchmesser, die am besten auf die nächste Schelle genietet werden. Diese Schildchen tragen ausser der Bezeichnung des Stromkreises den Leitungsquerschnitt und bei Abzweigleitungen noch eine kurze Angabe, wohin sie führen.

Zusammenstellung der Installationsarten.

204. Installationstabelle.

In der vorstehenden Installationstabelle sind die üblichsten Verlegungsarten eingetragen. Für jedes Leitungsmaterial ist die Spannungsgrenze eingetragen, ebenso für jeden Raum; besondere Beschränkungen für gewisse Fälle sind in den einzelnen Rubriken gesondert angegeben. Es ist noch ein Unterschied gemacht, ob ein Material „verboten“ oder „unzulässig“ ist. Ersteres soll andeuten, dass die Sicherheitsvorschriften das betreffende Material ausdrücklich verbieten.

Wo Paragraphen angezogen sind, beziehen sie sich auf die Vorschriften des Verbandes vom 1. Januar 1904.

Persönliche Sicherheit und Feuersicherheit in elektrischen Anlagen.

Für die Installation elektrischer Leitungen und die Wahl der Installationsmaterialien ist neben den allgemeinen technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten in erster Linie auch die Rücksicht auf die Sicherheit der mit den Anlagen in Berührung kommenden Personen massgebend. Aber nicht nur während des Baues, sondern auch während des späteren Betriebes, insbesondere in Hochspannungsanlagen oder solchen, deren Isolationszustand nicht dauernd auf einer normalen Höhe erhalten werden kann, darf die erforderliche Vorsicht nie ausser acht gelassen werden.

205. Lebensgefährliche Spannung.

Welche Spannung dem Menschen gefährlich werden kann, hängt nicht allein vom Isolationszustand der Anlage und der verschiedenen Empfindlichkeit der Organismen, sondern auch vom Widerstand des menschlichen Körpers und im wesentlichen von der Grösse der Berührungsfläche und somit von dem Widerstand ab, der zwischen Person und Leitung bezw. Erde liegt.

Durch Versuche am eigenen Körper stellte Prof. Weber in Zürich[1]) fest, dass, wenn beide Drähte mit trockenen Händen gefasst werden, es nicht möglich sei, eine Wechselspannung von 90 Volt und mit feuchten Händen eine solche von 50 Volt länger als 1 bis 2 Sekunden auszuhalten. Schon bei 30 Volt sei es nur mit Aufbietung aller Willenskräfte möglich, die Drähte wieder loszulassen. Bereits bei dieser Spannung, welche auch nur 5 bis 10 Sekunden ertragen werden kann, sind Hände und Arme wie gelähmt; der den Oberkörper durchfliessende Strom beträgt 0·012 bis 0·015 Amp. Bei höherer Spannung als 30 Volt konnte die Stromstärke nicht gemessen werden, da die geringe Zeit, während welcher die Spannung ertragen werden konnte, eine einwandsfreie Messung nicht zuliess.

Charles Brown fand, dass bei Gleichstrom etwa die doppelte Spannung wie bei Wechselstrom erforderlich sei, um die gleichen Erscheinungen hervorzurufen.

Weber ergänzte diese Versuche, indem er den einen Pol einer Wechselstromanlage erdete und den anderen Pol berührte, während er mit gutem Schuhwerk versehen, auf feuchtem Erdreich stand. Hierbei wurde die Spannung von 100 zu 100 Volt springend bis 2000 Volt erhöht, ohne eine Gefährdung der Person herbeizuführen, trotzdem zum Teil die Leitungen fest umfasst, die Berührungsfläche also ziemlich gross gewählt wurde. Hieraus kann naturgemäss nicht geschlossen werden, dass 2000 Volt ungefährlich

1) ETZ 1897, S. 615.

seien. Wahrscheinlich würde der Beobachter schwer geschädigt worden sein, wenn er plötzlich und unerwartet der hohen Spannung ausgesetzt worden wäre und infolgedessen der Schreck und seine Wirkungen zur Geltung gekommen wären, abgesehen davon, dass er durch das Schuhwerk ziemlich gut gegen Erde isoliert war.

Die ersten Versuche zeigen aber, dass eine verhältnismässig geringe Wechselstromspannung, wie sie für Hausinstallationen üblich ist, eine Gefährdung der Person herbeiführen kann, wenn beide Drähte berührt werden, andererseits zeigt die zweite Versuchsreihe, dass, wenn ein hoher Widerstand, hier durch gutes Schuhwerk gebildet, in den Stromkreis eingeschaltet wird, diese an und für sich gefährlichen Spannungen keine schädlichen Wirkungen hervorrufen.

Die gleichzeitige Berührung zweier Drähte wird selten vorkommen, wenn sie nicht absichtlich herbeigeführt wird, dagegen sind die Fälle überaus häufig, wo eine beabsichtigte oder unbeabsichtigte Berührung eines Poles stattfindet. Für den Fall, dass der nicht berührte Pol einen Erdschluss hat, wird nunmehr ein Strom den Körper durchfliessen, dessen Intensität von der Spannung der Anlage, die eine gegebene Grösse, deren Kapazität und dem durch den Körper und die Berührungsflächen gebildeten Widerstand, abhängig ist.

206. Widerstand des Menschen.

Dieser Widerstand setzt sich nun aus verschiedenen Widerständen zusammen, nämlich aus:

1. dem Widerstand der Person selbst,
2. dem Übergangswiderstand an der Berührungsstelle,
3. dem Übergangswiderstand zwischen dem Körper und Erde,
4. dem Isolationswiderstand des nicht berührten Leiters.

Der Widerstand des menschlichen Körpers beträgt nun nach Messungen, welche im Laboratorium von Siemens & Halske an Arbeitern vorgenommen wurden,[1]) im Mittel etwa 500 Ohm, von Hand zu Hand gemessen, wobei die Hände einen Körper voll umschlossen und die Berührungsfläche zwischen Hand und Körper zu etwa 100 cm^2 angenommen wurde. Bei einer Berührungsfläche von 1 cm^2 wurde ein Widerstand von 50000 Ohm ermittelt, worin die Übergangswiderstände enthalten sind.

Bei Messungen zwischen Hand und Fuss bezw. Erde wurden Widerstände gefunden, welche zwischen 900 bis 150000 Ohm schwanken, und zwar sind die Widerstände ganz und gar abhängig vom ständigen Beschäftigungsort der Menschen. Arbeiter, welche in trockenen Betrieben thätig sind, zeigten durchweg einen Widerstand zwischen Hand und Fuss, der 100000 Ohm überstieg. Der Übergangswiderstand erniedrigt sich aber um so mehr, je feuchter die Betriebe sind und wird ganz ungünstig in solchen Arbeitsstätten, in denen Laugen, Säuren u. s. w. verarbeitet werden. In diesen Räumen durchtränken die ätzenden Substanzen nicht nur das Schuhwerk, sondern greifen auch die Haut der Hände derart an, dass der oben erwähnte Hautwiderstand ganz erheblich unter den angegebenen Wert sinkt.

207. Künstliche Erhöhung der Übergangswiderstände.

Man wird daher bei allen Arbeiten an unter Spannung stehenden Metallteilen und bei der Betriebsführung elektrischer Anlagen bestrebt sein, um einen ausreichenden Schutz zu erlangen, die Übergangswiderstände künstlich zu erhöhen, und zwar erfolgt dies einmal durch die ständige Anordnung von kräftigen Gummidecken oder hölzernen Bedienungsgängen an solchen Stellen,

1) ETZ 1899, S. 602.

von denen aus die Bedienung der Anlage oder einzelner Teile derselben regelmässig erfolgt. Ferner wird durch die Bekleidung der Füsse und Hände durch Gummi eine wesentliche Schutzwirkung erreicht. Immerhin ist diese nur eine bedingte, da z. B. die Handschuhe nicht so stark ausgeführt werden können, wenn eine Bewegung der Glieder in ihnen nicht unmöglich gemacht werden soll. Einzelne Fingerlinge konnten zwar so hergestellt werden, dass sie erst bei einer Spannung von 16000 Volt durchschlagen werden, dagegen genügten 6400 Volt zum Durchschlagen, wenn ganze Handschuhe aus dem gleichen Material der Probe unterzogen wurden. Wesentlichen Vorteil bietet das Ausfüttern der Gummihandschuhe mit feinem Leder (hergestellt aus der Netzhaut des Rindes) oder seidenem Tricot.

Schliesslich liegt im Stromkreis noch der Isolationswiderstand des nicht berührten Poles. Die Gefahr wird daher bei der Berührung stromführender Leitungen um so geringer sein, je höher dieser ist. Es kann also für die persönliche Sicherheit sehr viel dadurch beigetragen werden, wenn durch die sachgemässe Überwachung elektrischer Anlagen der Isolationszustand dauernd gut erhalten und Erdschlüsse sofort beseitigt werden.

208. Höhe des schädlich wirkenden Stromes.

Aus den oben angegebenen Widerständen können nunmehr Schlüsse auf die den menschlichen Körper bei der Berührung eines Poles durchfliessenden Ströme gezogen werden, und zwar würde bei einer Spannung von 110 Volt ein Strom von etwa 0·12 Amp. auftreten können, wenn wir den in einer Zuckerraffinerie gemessenen ungünstigen Körperwiderstand von 900 Ohm zu Grunde legen. Zu berücksichtigen wäre aber, dass die Messungen ausgeführt wurden, wenn die Hände metallene Griffe fest umspannten, während bei einer unbeabsichtigten Berührung selten eine grössere Fläche an den Leiter kommt, der Übergangswiderstand also erheblich höher sein wird.

Wie oben bereits gesagt, stellte Prof. Weber fest, dass ein Strom von 0·015 Amp. nur kurze Zeit auszuhalten sei (in einem anderen Falle 0·02 bis 0·03 Amp.), während Swinburne[1]) in einem Falle 0·1 Amp. noch erträglich fand. In diesen Fällen wurde aber der Strom nur ganz allmählich gesteigert.

Welche Stromstärke ein Körper vertragen kann, ist wesentlich von dessen Konstitution und Lebenshaltung abhängig und überaus verschieden. Eine starke Beeinflussung der Empfindlichkeit findet durch den übermässigen Genuss von Alkohol statt.

Man wird als oberste Grenze des erträglichen Stromes etwa 0·03 Amp. ansehen müssen; ein höherer Strom wird sicher zu einer Schädigung der Person führen. Der oben erwähnte Ausnahmefall, dass 0·1 Amp. ertragen wurden, kann hier nicht in Betracht gezogen werden, um so weniger als diese Stromstärke nur durch allmähliche Steigerung erreicht wurde. Bei der unwillkürlichen Berührung stromführender Leitungen würde diese oder eine noch höhere Stromstärke aber nahezu plötzlich auftreten und infolge der Schreckwirkung der Organismus ganz erheblich in Mitleidenschaft gezogen.

Unter ungünstigen Umständen können also schon bei einer Spannung von 110 Volt tödliche Unglücksfälle vorkommen, wenn ein so geringer Widerstand eingeschaltet ist, dass ein höherer Strom als 0·1 Amp. zustande kommen kann, während andererseits Monteure, die mehrere Minuten lang mehreren tausend Volt ausgesetzt waren, mit dem Leben davonkamen.[2]) Merkwürdiger-

1) Electrical Review 1890, S. 301, 349; vgl. ferner H. Andriessen, Annalen der Physik 1902, Bd. 7, S. 379; G. Wiedemann, Elektrizität 4, S. 280—281, 1898.

2) Electrical Review 1894, S. 644, 719; ETZ 1894, S. 362.

weise ist konstatiert worden, dass in den jüngst in Deutschland erbauten Anlagen mit 30000 Volt keine so schweren Schädigungen der Menschen aufgetreten sind, wie bei den geringeren Spannungen. Es wird dies darauf zurückgeführt, dass in einer bestimmten Entfernung von den Leitungen der Strom dem Menschen entgegen springt und ein Lichtbogen auftritt, dessen Widerstand mildernd wirkt.

209. Sekundäre Folgen eines Schlages.

Auf die indirekten schädlichen Wirkungen elektrischer Schläge kann hier nicht eingegangen werden, es sei nur darauf hingewiesen, dass jeder Arbeiter, der an einer an und für sich gefährlichen Stelle, auf einem Mast, Dach u. s. w. arbeitet und dabei stromführenden Leitungen, selbst wenn sie ganz niedere Spannung führen, nahe kommt, sich so sicher stellen bezw. befestigen muss, dass er nicht herabfallen kann, wenn er infolge eines elektrischen Schlages erschrickt. Diese Fälle sind verhältnismässig häufig und haben in der Regel das Gerücht zur Folge, dass der Verunglückte vom elektrischen Strom erschlagen sei, während die Beschädigung nur die sekundäre Folge eines an und für sich völlig bedeutungslosen Schlages ist.

210. Schädigung des Organismus.

Die schädlichen Wirkungen, welche der elektrische Strom auf den menschlichen Organismus ausübt, erstrecken sich in erster Linie auf das Nervensystem, da die Nerven verhältnismässig gut leiten. Durch die Lähmung derselben wird die Lunge in Mitleidenschaft gezogen und gelähmt. Seltener wird durch die Schreckwirkung die Thätigkeit des Herzens beeinflusst.

Die Wiederbelebungsversuche der durch elektrische Schläge Getroffenen beschränken sich daher im wesentlichen auf die Einleitung künstlicher Atmung.

Der Tod kann auch durch starke Erwärmung der Muskeln eintreten, wenn diese sich zusammenkrampfen und dabei eine solche Arbeit leisten, dass sich der Körper erhitzt und die Albumine gerinnen.[1])

211. Versuche an Tieren.

Prof. Dr. JULIUS KRATTER in Graz berichtete über die Wirkungen elektrischer Ströme auf den tierischen Organismus vor dem XI. internationalen medizinischen Kongress zu Rom am 31. März 1894, und zwar waren als Versuchstiere Kaninchen, Meerschweine und Katzen zur Verwendung gekommen die Wechselspannungen bis zu 2000 Volt ausgesetzt wurden.

Das Versuchsergebnis geben die folgenden Zeilen wieder:

Meist erfolgt der Tod durch die bei Experimenten an Tieren allzeit auftretende plötzliche Hemmung der Atmung, eine Funktionsstörung, die in einem Teile der Fälle auch nach dem Aufhören des Reizes so lange Zeit andauert, bis definitiver Tod durch Erstickung eingetreten ist. Während dieser ist die Herzbewegung noch erhalten. Dauert der Stillstand der Atmung über eine gewisse Zeit (ca. 2 Minuten) an, so tritt, wie bei der mechanischen Erstickung, sekundärer Herzstillstand (Tod) ein. Nicht selten jedoch beginnt das Tier wieder spontan zu atmen und erholt sich in einiger Zeit völlig. Es werden überhaupt Tiere auch durch Ströme von hoher Spannung (1500—2000 Volt) nicht sicher und leicht getötet. Die Gefährlichkeit des elektrischen Stromes für eine Tierspecies scheint von der Organisation des zentralen Nervensystems abzuhängen und mit der höheren Entwickelung des Gehirnes in gleichem Masse zuzunehmen. Dadurch würde die Thatsache ihre Erklärung finden, dass Menschen fast ausnahmslos durch Ströme getötet werden, welche Meerschweinchen und Kaninchen auch dann nicht sicher töten, wenn die Elektroden am Kopfe angelegt werden.

---

1) Lumière Electrique Bd. 44, S. 103.

Manchmal tritt der Tod blitzähnlich durch augenblickliche Hemmung der Herzbewegung, somit durch primären Herzstillstand ein, ein Vorgang, der als Shock (reflektorischer Herzstillstand) bezeichnet zu werden pflegt. Eine allmähliche Erlahmung der Herzthätigkeit, wie sie beim Menschen beobachtet worden ist, konnte experimentell nie erzeugt werden.

In keinem dieser Fälle war eine anatomische Veränderung, welche den Tod zu erklären vermochte, auffindbar. Unzweifelhaft handelt es sich um feine, wahrscheinlich nur molekulare, vielleicht chemische und morphologisch gar nicht erkennbare Veränderungen in den Ganglienzellen des Respirations- und Zirkulationszentrums.

In einzelnen Fällen kommt es zu mechanischen Läsionen in Form von Zerreissungen der Blutgefässe und zur Quetschung der Gehirnoberfläche. Das Tier geht an Hirndruck mitunter erst nach vielen Stunden zu Grunde.

Die anatomische Diagnose wird gesichert durch eigentümliche Verbrennungen an den Kontaktstellen und durch Blutungen, welche den Weg bezeichnen, den der Strom durch den Körper genommen hat. Diese mitunter nur kapillären Blutaustretungen finden sich insbesondere an den Gefässscheiden.

212. Hilfeleistung bei Unfällen durch elektrische Schläge.

Der folgende Paragraph giebt eine Anleitung zur ersten Hilfeleistung bei Unfällen in elektrischen Betrieben, in denen auch auf die durch Kurzschlüsse hervorgerufenen Verbrennungen Rücksicht genommen ist. Dieselbe ist von der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik herausgegeben worden.

Anleitung zur ersten Hilfeleistung bei Unfällen in elektrischen Betrieben.[1])

I. Entfernung eines Verunglückten von der Leitung.

1. Man stelle die Maschine ab oder schalte den betr. Stromkreis mit allen Polen von der Stromquelle (Maschine, Transformator) ab.
2. Erfordert dies zuviel Zeit, so suche man die Leitungen kurz zu schliessen und zu erden, d. h. gut leitend mit der Erde, eisernen Masten, der Wasserleitung oder dergl. zu verbinden.
3. Berührt der Verunglückte nur einen Leitungsdraht, so genügt es vielfach, diesen zu erden, oder den Verunglückten vom Boden abzuheben.
4. Wenn die Leitungsdrähte nicht kurz geschlossen sind, darf nur die Leitung geerdet werden, an der sich der Verunglückte befindet.
5. Der Helfende beobachte zum eigenen Schutze folgende Regeln:
   a) Jede Berührung der Leitung, auch der kurzgeschlossenen, sowie des mit der Leitung in Verbindung stehenden Verunglückten ist gefährlich, solange die Leitung nicht geerdet ist.
   b) Der Helfende stehe daher möglichst gut von der Erde (eisernen Masten u. s. w.) isoliert, etwa auf Glas, trockenem Holz oder zusammengelegten Kleidungsstücken, und fasse den Verunglückten nur an seinen Kleidungsstücken an oder bediene sich eines trockenen Tuches oder eines trockenen Holzstückes, um ihn von der Leitung zu entfernen.
   c) Das Kurzschliessen der Leitungsdrähte ist vor dem Erden vorzunehmen, wenn es durch Überwerfen eines Drahtes, nasser Tücher oder dergl. geschehen kann, ohne dass sich der Helfende dadurch

1) Herausgegeben von der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik.

mit den Leitungsdrähten in leitende Verbindung bringt. Anderenfalls ist zunächst diejenige Leitung zu erden, an der sich der Verunglückte befindet (vgl. 4).

d) Beim Erden ist der dazu benutzte Draht (die Eisenstange u. dergl.) zuerst mit der Erde (dem eisernen Maste u. s. w.), dann mit der Leitung in Berührung zu bringen.

II. Verbrennungen.

1. Bei blosser Rötung und Schmerz kühle man durch kaltes Wasser (Wasserleitung) oder Eis, lege einen Verband mit Watte an, die in Brandliniment getaucht ist und befestige darüber eine Binde.

2. Bei Blasenbildung sind die Blasen nicht abzureissen und nicht aufzustechen. Bei etwaigem Auslaufen der Flüssigkeit ist eine vierfache Lage von sterilisierter Gaze und darüber Watte und eine Binde zu legen. (Vor dem Abschneiden der Gaze sind die Hände auf das sorgfältigste in Wasser und hierauf in Sublimatlösung 1:1000 zu waschen.)

3. Bei Verkohlungen und Schorfbildungen ist eine vierfache Lage von sterilisierter Gaze, darauf Watte und Binde zu legen.

III. Bewusstlosigkeit.

1. Alle den Körper beengenden Kleidungsstücke (Hemdkragen, Beinkleider) sind zu öffnen. Man lege den Körper auf den Rücken und bringe ein Polster aus zusammengelegten Kleidungsstücken unter die Schultern, damit der Kopf niedriger liegt.

2. Man suche hierauf künstliche Atmung hervorzurufen, wie dieses bei Ertrunkenen geschieht. Man kniee am Kopf des Verletzten nieder (das Gesicht ihm zugewandt), ergreife beide Arme unterhalb der Ellbogen und ziehe sie kräftig im Bogen über den Kopf, so dass sie beinahe zusammenkommen (Einatmung). In dieser Stellung sind die Arme 2 bis 3 Sekunden festzuhalten und alsdann auf demselben Wege zurückzuführen und kräftig gegen die Seiten des Brustkastens zu drücken, um die Luft aus den Lungen herauszutreiben (Ausatmung).

3. Dieses Verfahren wird etwa 16 mal in der Minute wiederholt, sofern die Atmung nicht früher wiederkehrt.

4. Sind zwei Helfer zur Hand, so fasse während dieser Versuche ein zweiter die Zunge des Verletzten mit einem Taschentuch, ziehe sie kräftig heraus, so oft die Arme über den Kopf gezogen werden und lasse sie zurückgehen, wenn die Arme zur Brust geführt werden (also genau so oft, wie das Umlegen der Arme). Wenn der Mund nicht aufgeht, öffne man ihn gewaltsam mit Holz oder dem Griff eines Taschenmessers.

5. Sind noch mehrere Helfer zur Hand, so sind die unter 1—3 aufgeführten Versuche von zweien auszuführen, indem jeder einen Arm ergreift und auf das Kommando 1, 2—3, 4 machen beide gleichzeitig diese Bewegungen oder lösen sich gegenseitig, wenn einer müde, ab.

6. Es ist zwecklos und unratsam, geistige Getränke in den Mund zu giessen. Dagegen empfiehlt es sich, den Körper kräftig zu frottieren.

Unter allen Umständen ist sofort nach einem Arzt zu senden.

Welche Vorsichtsmassregeln müssen nun getroffen werden, um die Bedienung einer elektrischen Anlage so ungefährlich wie nur möglich zu machen?

213. Vorsichtsmassregeln.

In allererster Linie muss jede Anlage so ausgeführt werden, dass sie unter Berücksichtigung aller örtlichen Verhältnisse den weitestgehenden an sie gestellten Anforderungen in Bezug auf Betriebssicherheit und einwandsfreien Isolationszustand genügt.

Wenn auch an und für sich die Erfüllung dieser Bedingungen allein nicht ausreichen würde, um z. B. in einer Hochspannungsanlage die Berührung einer stromführenden Leitung ungefährlich zu machen, so wird doch ganz wesentlich hierdurch zur Erhöhung der persönlichen Sicherheit beigetragen. Im Falle der Berührung würde bei guter Ausführung und Instandhaltung der Anlage jedenfalls keine so schwere Schädigung des Organismus herbeigeführt werden, als wenn durch die leider sehr häufige mangelhafte Ausführung durch gewissenlose Installateure der Isolationszustand einer Anlage auf einen überaus niederen Stand herabgedrückt wird. Bei guter Ausführung aber wird der Isolationswiderstand gegen Erde die in den Sicherheitsvorschriften des V. D. E. verlangten Mindestwerte in den weitaus meisten Fällen überschreiten. Dort aber, wo die dauernde Erhaltung dieses Wertes infolge örtlich ungünstiger Verhältnisse unmöglich ist, muss die Bedienung der Anlage so geregelt werden, dass dem Wärter kein Schaden zugefügt werden kann.

Sicherheitsvorschriften.

Um eine weitgehende persönliche Sicherheit und eine ausreichende Gewähr gegen Feuerschaden bei der Erbauung elektrischer Anlagen zu erzielen, hat man schon im Jahre 1888 danach getrachtet, Vorschriften einzuführen. In diesem Jahre ging der elektrotechnische Verein in Wien bahnbrechend voran; im Jahre 1892 erliess der Verband Deutscher Privat-Feuerversicherungs-Gesellschaften zum ersten Male seine „Vorsichtsbedingungen".

214. Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

Im Jahre 1894 folgte der Verband Deutscher Elektrotechniker, dessen Vorschriften als Richtschnur zu dienen haben und von den meisten deutschen Regierungen anerkannt worden sind. Ursprünglich waren diese in drei Gruppen geteilt, und zwar wurden nach der Spannung unterschieden:

Vorschriften für Niederspannung bis 500 Volt,

Vorschriften für Mittelspannung von 500 bis 1000 Volt,

Vorschriften für Hochspannung über 1000 Volt.

Bei der in den letzten zwei Jahren erfolgten Neubearbeitung wurde statt der Drei- eine Zweiteilung gewählt, und zwar fallen unter die Abteilung I alle die Anlagen bezw. Teile derselben, deren effektive Gebrauchsspannung zwischen irgend zwei gegen Erde isolierten Leitungen 500 Volt nicht überschreitet und bei denen gleichzeitig die effektive Spannung zwischen irgend einer Leitung und Erde 250 Volt nicht überschreiten kann, ausgenommen sind jedoch unterirdische Leitungsnetze, elektrische Bahnen und elektrochemische Betriebsapparate. Bei Akkumulatoren ist die Entladespannung massgebend.[1])

1) § 1a der Sicherheitsvorschriften.

Abteilung II umfasst dann alle Anlagen, welche mit einer höheren als der vorstehend angegebenen betrieben werden.[1])

Von den Regierungen und Behörden sind diese Vorschriften als massgebend anerkannt worden und dementsprechend ist ihre Einführung sehr schnell erfolgt.[2])

Die Vorschriften der Feuerversicherungs-Gesellschaften sind neben den Verbandsvorschriften bestehen geblieben und sind für die Besitzer elektrischer Anlagen von grösstem Interesse, da ihre Befolgung in den Policen gefordert und Verstösse dagegen unter Umständen zur Verweigerung der Entschädigung im Schadenfalle führen kann. Da sie weit weniger bekannt sind als die Sicherheitsvorschriften des Verbandes, so seien sie hier wiedergegeben und gleichzeitig auch die Anweisung der Gesellschaften für das Betriebspersonal, damit die Anlagen dauernd sachgemäss unterhalten werden.

Vorsichtsbedingungen für elektrische Licht- und Kraftanlagen.

215. Vorsichtsbedingungen der Feuerversicherungs-Gesellschaften.

Die nachstehenden Bedingungen gelten für Anlagen in Räumen jeder Art. Für elektrische Installationen auf Theaterbühnen und in Schaufenstern von Warengeschäften sowie für Räume, in welchen leicht entzündliche Gegenstände in grösseren Mengen aufgestapelt werden, bleiben ausserdem besondere Zusatzbestimmungen für den Einzelfall vorbehalten.[3])

I. Elektrische Betriebsräume.

1. a) Elektrische Betriebsräume müssen unter der Aufsicht von instruiertem Betriebspersonale stehen oder, soweit die Abwesenheit des Betriebspersonals statthaft ist, für Unbefugte unzugänglich sein.

b) In elektrischen Betriebsräumen dürfen brennbare Gegenstände nur unter Verschluss oder mit geeignetem Schutze oder in solcher Entfernung von den elektrischen Maschinen, Instrumenten,

1) a) Vorschriften für Deutschland.
Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Starkstromanlagen:
I. Niederspannung,
II. Hochspannung.
Sicherheitsvorschriften für den Betrieb elektrischer Starkstromanlagen. Herausgegeben vom Verband Deutscher Elektrotechniker. Verlag von JUL. SPRINGER, Berlin.
Wichtig sind die im Auftrage des V. D. E. von Dr. C. L. WEBER herausgegebenen trefflichen Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften. Verlag von JUL. SPRINGER, Berlin.

b) Vorschriften für ausserdeutsche Staaten.
Frankreich: ETZ 1898, S. 706; 1895, S. 647 (Pariser Stadtverwaltung).
Russland: ETZ 1898, S. 862.
Schweiz: ETZ 1900, S. 174, 201, 219, 359; 1897, S. 150. Schweizerisches Bundesgesetz betr. die elektrischen Schwach- und Starkstromanlagen vom 24. 6. 02. — ETZ 1903, S. 12.
England: ETZ 1897, S. 640; 1898, S. 388 für Hochspannung; 1897, S. 439 für Centralen.
Südafrika: ETZ 1903, S. 373.
Österreich: Vorschriften des elektrotechnischen Vereins in Wien.

2) Vgl. ETZ 1896, S. 456; 1897, S. 391; 1898, S. 711; 1899, S. 561; 1902, S. 732.

3) Diese Sonderbestimmungen sind bisher nicht erlassen.

Apparaten und Leitungen des Betriebes sich befinden, dass sie durch etwaige Wärme- oder Feuererscheinungen in der elektrischen Betriebsanlage nicht entzündet werden können.

2. Akkumulatorenräume müssen während der Ladung gelüftet sein und dürfen beim Betriebe nur mit elektrischen Glühlampen (Glühlampen in luftdicht schliessender Glashülle) beleuchtet werden. Während der Ladung dürfen darin brennende oder offen glühende Gegenstände nicht geduldet werden.

II. Maschinen, Instrumente, Apparate.

3. a) Die stromführenden Teile von elektrischen Maschinen, Instrumenten und Apparaten, soweit sie nicht in elektrischen Betriebsräumen sich befinden, müssen von Schutzhüllen so weit umgeben sein, dass sie vor zufälliger Berührung oder Verletzung geschützt sind und müssen, sofern sich brennbare Gegenstände in deren Nähe befinden können, so beschaffen und angeordnet sein, dass etwaige Wärme- oder Feuererscheinungen, welche infolge der Wirkung des sie durchfliessenden Stromes auftreten können, diese brennbaren Gegenstände nicht entzünden können.

b) Elektrische Instrumente und Apparate müssen ebenso sorgfältig von Erde isoliert sein, wie die an sie angeschlossenen Leitungen. Ausgenommen hiervon sind Beleuchtungskörper.

4. a) Apparate zur Stromunterbrechung, welche ausserhalb elektrischer Betriebsräume verwendet werden, müssen Momentschalter sein, bei welchen sich beim Öffnen kein dauernder Lichtbogen bilden und im normalen Betriebe keine Erhitzung eintreten kann.

b) Die normale Betriebsstromstärke und die maximale Spannung muss auf dem festen Teile aller Schalter und Kontaktvorrichtungen verzeichnet sein.

5. Elektrische Maschinen, Instrumente, Sicherungen und andere Apparate jeder Art, welche nicht in luft- und staubdichten Schutzgehäusen stehen, dürfen in Räumen, in welchen explosible Stoffe verarbeitet oder aufgespeichert werden, oder in welchen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Fasern oder Staub bilden oder anhäufen können, nicht aufgestellt werden.

III. Leitungen.

6. Holzleisten sind verboten, Krampen nur an betriebsmässig geerdeten Leitungen gestattet.

7. Leitungen müssen überall da, wo sie mit brennbaren Gegenständen in Berührung kommen können, vor der Berührung mit diesen und ausserhalb elektrischer Betriebsräume auch vor zufälliger Verletzung geschützt sein.

8. Nicht geerdete blanke Leitungen sind in Wohnräumen, in Räumen, in welchen leicht entzündliche Stoffe erzeugt oder aufgespeichert werden, blanke Leitungen und Mehrfachschnurleitungen in Räumen, in welchen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Fasern oder Staub bilden oder anhäufen können, verboten.

9. In Räumen mit ätzenden Dünsten sind nur Kabel und blanke Leitungen zu verwenden. Je nach der Art der Dünste sind Kabel und Leitungen gegen chemische Angriffe zu schützen.

10. Freileitungen sind den örtlichen Verhältnissen entsprechend durch Blitzschutzvorrichtungen, welche auch bei wiederholten Entladungen wirksam bleiben, zu schützen.

11. a) Schnurpendel mit biegsamer Leitungsschnur sind nur dann zulässig, wenn das Gewicht der Lampe nebst Schirm von einer besonderen Tragschnur getragen wird, welche mit der Schnur verflochten sein kann. An der Aufhängestelle und an der Fassung müssen die Leitungsdrähte länger sein als die Tragschnur, so dass kein Zug auf die Verbindungsstellen ausgeübt wird.

b) Zuleitungsdrähte von Bogenlampen, welche als Aufhängevorrichtung dienen sollen, dürfen ausserdem nicht verdrillt werden.

c) Im übrigen dürfen Leitungen nicht zur Aufhängung von Lampen oder sonstigen Gegenständen benützt werden.

d) Beleuchtungskörper müssen so angebracht sein, dass die Zuführungsdrähte nicht durch Drehen des Beleuchtungskörpers auf Zug beansprucht oder verletzt werden können.

12. a) Verbindungen zwischen zwei Leitungen müssen verschraubt oder verlötet oder auf gleichwertige Weise ausgeführt sein. Die Verbindungsstellen sind bei isolierten Leitungen der Isolierung der Leitung gleichwertig zu isolieren.

b) Mehrfachschnurleiter dürfen nur durch Abzweigklemmen auf isolierender Unterlage an Leitungen angeschlossen werden.

c) Leitungen für bewegliche Verbrauchsapparate müssen mittels lösbarer Kontakte (Steckkontakte u. s. w.) an die Leitungen angeschlossen werden.

d) Verbindungen zwischen Leitungen und Apparaten dürfen nur durch Verschraubung, soweit erforderlich unter Verwendung von Kabelschuhen, hergestellt sein.

e) Abzweig- und Verbindungsstellen müssen durch feste Unterstützungen von Zug entlastet sein.

13. a) Leitungen dürfen nur so stark mit Strom belastet werden, dass eine für das Handgefühl erhebliche Erwärmung derselben vermieden wird.

b) Der geringste zulässige Querschnitt ist bei isolierten Leitungen 1 mm², an und in Beleuchtungskörpern $^3/_4$ mm², bei blanken Leitungen in Gebäuden 4 mm², bei Freileitungen 6 mm² für Niederspannung und 10 mm² für Hochspannung.

c) Bei Gleichstromdreileitersystemen für Niederspannung muss der neutrale Mittelleiter geerdet sein.

IV. Sicherungen.

14. a) Die neutralen oder Nullleitungen bei Mehrleiter- oder Mehrphasensystemen sowie alle betriebsmässig geerdeten Leitungen dürfen keine Sicherungen enthalten.

b) Alle übrigen Leitungen müssen von der Maschinenschalttafel ab durch Schmelzsicherungen oder andere gleichwertige selbsttätige Stromunterbrecher geschützt werden.

c) Mehrere Verteilungsleitungen dürfen durch eine gemeinsame Sicherung von höchstens 6 Amp. Normalstromstärke geschützt werden, wobei Querschnittsverminderungen und Abzweigungen jenseits dieser Sicherung nicht weiter gesichert zu werden brauchen.

Bei grossen Beleuchtungskörpern können nach eingeholter Genehmigung der Versicherungsgesellschaft ausnahmsweise gemeinsame Sicherungen für bis 12 Amp. bei bis 130 Volt zugelassen werden.

d) Lösbare Kontakte müssen ohne Ausnahme auf der Seite des festen Teiles allpolig gesichert sein.

e) Im übrigen sind Sicherungen an allen Stellen anzubringen, wo sich der Querschnitt in der Richtung nach der Verbrauchsstelle hin vermindert; jedoch sind bei Querschnittverkleinerungen, wo die vorhergehende Sicherung die schwächeren Querschnitte schützt, weitere Sicherungen nicht mehr erforderlich.

f) Das Anschlussleitungsstück von der Hauptleitung zur Sicherung darf nur, wenn seine einfache Länge nicht mehr als 1 m beträgt, von geringerem Querschnitte sein als die Hauptleitung und darf, wenn von geringerem Querschnitte, nicht aus Mehrfachleitern bestehen.

15. a) Die Sicherung ist der Betriebsstromstärke der zu schützenden Leitung anzupassen.

b) Die Abschmelzstromstärke bezw. Ausschaltestromstärke soll das Doppelte ihrer Normalstromstärke sein.

c) Schmelzsicherungen dürfen beim Abschmelzen keinen dauernden Lichtbogen erzeugen und keine gefährlichen Explosionserscheinungen hervorrufen.

d) Schmelzstücke aus plastischem Metall müssen in Kontaktstücke aus Kupfer oder gleich geeignetem Metall eingelötet sein.

e) Die Normalstromstärke und die Maximalspannung muss auf dem Schmelzeinsatze verzeichnet sein.

f) Sicherungen bis 30 Amp. müssen so eingerichtet sein, dass eine fahrlässige oder irrtümliche Verwendung zu starker Schmelzeinsätze vermieden wird.

V. Lampen.

16. Glühlampen, welche mit entzündlichen Stoffen in Berührung kommen können, müssen mit Schalen, Glocken oder Drahtgittern so versehen sein, dass die Berührung der Lampen mit entzündlichen Stoffen verhindert wird.

17. In Räumen, in welchen explosible Stoffe verarbeitet oder gelagert werden, oder in welchen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Fasern oder Staub bilden oder anhäufen können, müssen Glühlampen mit dicht schliessenden Überglocken, welche auch die Fassungen einschliessen,

versehen sein. In solchen Räumen
deren glühender Teil in einem luft
jede andere Lampenart ist verboten

18. a) Bogenlampen müssen
das Herausfallen glühe

b) In Räumen, welche
müssen die Aschentell
aus Metall bestehen u

VI.

Die in den Absätzen 3a,
Art und die Verwendung der
in Bezug auf die Art und
hierbei in Betracht kommend
lich, nachträglich erfüllt we
einer solchen Änderung wie
arbeiten dürfen dabei nur
werden, als dasselbe mit
beiten vertraut ist.

VI

19. a) Neuanla
betriebsetz
sind durc
alljährlich
schriftlic
verabre
festzus
nügt:
licher
Änd

ges

b) B
w

Anweisu

216. Betriebsanweisung der Feuerversicherungsgesellschaften.

Z
struie
perso

nur

von den elektrischen Maschinen, Instrumenten, Apparaten und Leitungen des Betriebes sich befinden, dass sie durch etwaige Wärme- oder Feuererscheinungen in der elektrischen Betriebsanlage nicht entzündet werden können.

Zu 2. Akkumulatorenräume müssen während der Ladung gelüftet sein und dürfen beim Betriebe nur mit elektrischen Glühlampen (Glühlampen in luftdicht schliessender Glashülle) beleuchtet werden; während der Ladung dürfen darin brennende oder offen glühende Gegenstände nicht geduldet werden.

In Akkumulatorenräumen, welche durch Öfen geheizt werden, muss das Feuer während der Ladung gelöscht werden.

Zu 3. Die zum Schutze der stromführenden Teile der elektrischen Maschinen, Instrumente und Apparate angebrachten Vorrichtungen müssen stets in einem dem Zwecke derselben entsprechenden Zustande erhalten und bei etwaigen Beschädigungen wieder in Stand gesetzt oder erneuert werden.

Elektrische Maschinen, Instrumente und Apparate müssen in ordnungsmässigem Zustande erhalten werden, so dass keine abnormen Wärme- und Feuererscheinungen auftreten.

Zu 5. In Räumen, in welchen explosible Stoffe verarbeitet oder gelagert werden, oder in welchen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Fasern oder Staub bilden oder anhäufen können, dürfen die luft- und staubdichten Schutzkästen, in welchen elektrische Maschinen, Instrumente und Apparate eingeschlossen sind, nicht geöffnet werden, so lange die Stromleitungen nicht in allen Polen abgeschaltet und die Leitungen in diesen Räumen vollständig spannungslos gemacht sind.

In Räumen, in welchen elektrische Maschinen, Instrumente, Sicherungen und andere Apparate jeder Art ohne luft- und staubdichte Schutzgehäuse sich befinden, dürfen keine explosiblen Materialien und keine Materialien, welche explosible Gase, Fasern oder Staub entwickeln können, verarbeitet oder aufbewahrt werden.

Zu 7. Die zum Schutze der Leitungen gegen Verletzung und gegen Berührung mit brennbaren Gegenständen angebrachten Vorrichtungen müssen in guter Beschaffenheit erhalten bleiben und sind bei etwaigen Beschädigungen thunlichst bald wieder herzustellen oder zu ergänzen.

Zu 8. In Räumen, in welchen sich blanke Leitungen befinden, dürfen leicht entzündliche oder explosible Materialien oder Materialien, welche explosible Gemische von Gasen, Fasern oder Staub bilden können, nicht verarbeitet oder gelagert werden.

Zu 9. In Räumen mit ätzenden Dünsten müssen die zum Schutze der Leitungen und Kabel dienenden Mittel (Anstriche), soweit erforderlich, erneuert werden.

Zu 10. Es ist darauf zu achten, dass Blitzschutzvorrichtungen in ordnungsmässigem Zustande erhalten werden.

Zu 11c. Es ist verboten, irgend welche Gegenstände an Leitungen aufzuhängen.

Zu 12a. Es ist verboten, Leitungen anders als durch Verschraubung oder Verlötung oder auf gleichwertige Art miteinander zu verbinden.

Zu 12b. Es ist verboten, Mehrfachschnurleiter anders als durch Abzweigklemmen auf isolierender Unterlage an Leitungen anzuschliessen.

Zu 12c. Es ist verboten, Leitungen für bewegliche Verbrauchsapparate ohne lösbare Kontakte (Steckkontakte u. s. w.) an Leitungen anzuschliessen.

Zu 12d. Es ist verboten, Leitungen an Apparate anders als durch Verschraubung anzuschliessen.

Zu 14b. Es ist verboten, Leitungen in Betrieb zu nehmen, welche nicht ordnungsmässig mit Sicherungen versehen sind.

Zu 15f. Es ist dem Betriebspersonale auf das strengste verboten, eine infolge von Fehlern der Installation durchgeschmolzene Sicherung durch eine stärkere zu ersetzen. Ist eine Sicherung geschmolzen, so muss der Fehler in der Leitung oder in dem Verbrauchsapparate, welcher das Schmelzen der Sicherung bewirkt hat, festgestellt und beseitigt werden. Solange neue Sicherungen von gleicher Stärke wie die alten wieder durchschmelzen, ist der Fehler noch nicht beseitigt, und vor der Beseitigung desselben darf die fehlerhafte Leitung nicht betrieben werden.

Zu 16. Schalen, Glocken, Drahtgitter, welche dazu bestimmt sind, Glühlampen vor entzündlichen Stoffen zu schützen, dürfen während des Gebrauches dieser Glühlampen nicht abgenommen werden.

Zu 17. In Räumen, in welchen explosible Stoffe verarbeitet oder gelagert werden, oder in welchen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Fasern oder Staub bilden oder anhäufen können, dürfen Glühlampen unter keinen Umständen ohne die vorgeschriebenen luft- und staubdichten Glocken eingeschaltet sein. Wird eine solche Schutzglocke beschädigt, dann muss die betreffende Glühlampe so lange ausgeschaltet bleiben, bis sie wieder mit einer solchen Schutzglocke versehen ist. Hat man in solchen Räumen Glühlampen auszuwechseln, dann muss die Lampenleitung so lange ausgeschaltet bleiben, bis die Schutzglocke wieder ordnungsmässig aufgesetzt ist. Es ist strengstens verboten, in solchen Räumen andere Lampen als die hier bezeichneten zu verwenden.

Zu 18. Beschädigte Glocken und Aschenteller an Bogenlampen sind sofort zu ersetzen. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass stets passende Glocken und Aschenteller zum Ersatz vorhanden sind. In Räumen, in welchen entzündliche Gegenstände sich befinden, dürfen andere als genau passende Aschenteller nicht verwendet werden und hier dürfen Reparaturen oder irgend welche Arbeiten an Bogenlampen während des Betriebes der Lampen bei abgenommenen Glocken oder Aschentellern nicht vorgenommen werden.

Zu 19. Reparaturen, Veränderungen und Erweiterungen an bestehenden Anlagen dürfen nur insoweit von dem Betriebspersonale ausgeführt werden. als dasselbe mit der bedingungsmässigen Ausführung solcher Arbeiten vertraut ist.

Isolationsfehler und deren Entstehung.

Wir haben nun zu unterscheiden zwischen solchen Massnahmen, welche erforderlich sind, um eine Feuersgefahr zu vermeiden und solchen, welche die mit der Anlage oder ihren einzelnen Teilen in Berührung kommenden Menschen gegen körperliche Schäden schützen sollen. Die Anlagen müssen aber ferner auch so ausgeführt werden, dass eine weitgehende Betriebssicherheit gewährleistet wird. Wir wollen zunächst die persönliche Sicherheit weiter im Auge behalten.

217. Überwachung der Anlagen.

Zunächst ist es, wie an anderer Stelle des näheren auseinandergesetzt, dringend erforderlich, den Isolationszustand zu überwachen und in dauernd gutem Zustande zu erhalten. Die Überwachung erfolgt durch regelmässig

wiederholte Isolationsmessungen[1]) und durch dauernd eingeschaltete, an den Schalttafeln angebrachte Instrumente.

218. Ursachen der Isolationsfehler.

Wir haben bereits früher[2]) gesehen, dass der Leiter mit einer Isolierschicht umkleidet wird, um den Stromübergang von einem Leiter zum anderen und vom Leiter zur Erde zu vermeiden. Wir haben gesehen, dass für oberirdisch verlegte Leitungen die Stromverluste dadurch vermieden werden, dass die Leitungen auf besonderen Isolierkörpern befestigt werden, die je nach der verwendeten Betriebsspannung ausgebildet sind. Je höher aber die Spannung wird, um so schwieriger wird es, die Isolation zu erhalten und bei 30000 Volt bereits hört die Luft auf, ein stets zuverlässiger Isolator zu sein; die Leitungen beginnen zu leuchten, die Elektrizität ist bestrebt, an allen Spitzen und Ecken zu entweichen und ihren Weg zur Leitung anderen Potentials oder zur Erde zu suchen. Schliesslich wird bei etwa 60000 Volt oder wenig mehr die praktische Grenze der Spannungserhöhung liegen, wenn Luftleitungen verwendet werden.[3]) Für noch höhere Spannungen würden unterirdisch verlegte Kabel Verwendung finden müssen, die aber zur Zeit noch nicht fabrikationsmässig hergestellt werden.

Einen absoluten Isolator giebt es nun nicht, man wird bei jeder, auch der bestausgeführten Anlage einen Stromübergang zur Erde konstatieren können, wenn man nur genügend empfindliche Instrumente benützt; der Isolationszustand einer Anlage wird aber in solchen Grenzen gehalten werden müssen, dass der Stromverlust gewisse zulässige Grenzen nicht überschreitet, wenn nicht eine Gefährdung der Anlage, der Gebäude und unter Umständen auch der mit den Leitungen in Berührung kommenden Personen eintreten soll.

Naturgemäss wird nun in erster Linie ein Stromverlust an den Stellen auftreten, wo die Leitungen befestigt sind, wo sich also der Strom über den Isolierkörper hinweg einen Weg bahnen kann. Von der Anzahl der Befestigungsstellen wird daher zum grossen Teil der Isolationswiderstand abhängig sein. Verteilt sich nun der gesamte in einer Anlage zulässige Stromverlust gleichmässig auf alle Befestigungsstellen, so wird eine Gefahr nie vorhanden sein, sie wird jedoch sofort bedrohlich, wenn derselbe an einer Stelle auftritt.

Aber nicht nur an den Leitungen, sondern auch in jedem angeschlossenen Apparat wird der Strom versuchen zu entweichen, sei es durch Oberflächenleitung oder unter Durchbrechung irgend welcher Isolierung.

219. Einflüsse auf die Isoliermittel.

Die für die Isolierung der Drähte verwendeten Isoliermaterialien sind mannigfachen Beeinflussungen ausgesetzt, die zu einer Verminderung der Isolierfähigkeit der Hülle führen. So findet häufig eine Verrottung des für Glühlichtschnüre verwendeten Gummis statt, wenn nicht ganz einwandfreies Material verwendet wird; vulkanisierter Gummi kann brüchig und hart werden, wenn er zu viel Schwefel enthält. Die zeitweise für Hochspannungsanlagen verwendeten Isolatoren aus Hartgummi litten beträchtlich unter der Einwirkung des in diesen Anlagen gebildeten Ozons und mussten aus diesem Grunde verworfen werden. Guttaperchaadern müssen der Luft entzogen werden, auch Gummi wird durch Luft und Licht angegriffen und wird daher in der Regel mit imprägnierten Umklöppelungen überzogen. Mit der mehr und mehr fortschreitenden Verrottung eines Isoliermaterials verliert es auch

---

1) Näheres siehe Hdb. VI, 1, S. 124; ferner Hdb. II.
2) Hdb. VI, 1: Fabrikation elektrischer Leitungen und Kabel.
3) Hdb. VI, 1, S. 377.

seine Elastizität, so dass, da die meisten Leitungen, sei es durch Schwingungen ihrer Befestigungsstellen, sei es durch Temperaturveränderungen, kleine Bewegungen machen, kleine Risse und Brüche auftreten, in welche Feuchtigkeit eindringen und das Zerstörungswerk schneller vollenden kann. Treten chemische Einflüsse auf, so kann unter ungünstigen, allerdings sehr häufig beobachteten Umständen die Zerstörung der Isolierung so schnell vor sich gehen, dass schon nach wenigen Monaten eine Erneuerung der Leitungen vorgenommen werden muss.

Die Isolierkörper (Rollen, Isolatoren), auf denen die Leitungen verlegt sind, beschlagen mit leitenden Flüssigkeiten, die sich auch in feinen Rissen derselben festsetzen und dem Strom einen bequemen Weg bieten. Je höher die Betriebsspannung, um so mehr muss darauf geachtet werden, dass die Oberflächenleitung vermieden wird.

Alle diese Umstände führen zu einer Entweichung des Stromes und auf diesem Wege thut er selbst das übrige, um den Fehler zu vergrössern, so dass schliesslich unter Durchbrechung der Isolation eine Verbindung des Leiters mit der Erde oder mit dem Leiter anderen Potentials hergestellt wird.

220. Auftreten von Fehlern. Wenn nun an irgend einer Stelle im Netz ein Fehler auftritt und wir annehmen wollen, dass wir es mit einem — praktisch allerdings unmöglichen — absolut isolierten Netz zu thun haben, so würde an dieser Stelle ein Stromübergang nicht stattfinden können; der betreffende Punkt nimmt ja das Potential der Erde an. Praktisch wird auch jede Fehlerstelle einen Strom durchlassen, dessen Höhe grösser oder kleiner sein wird, je nachdem der übrige Teil des Netzes isoliert ist. Befindet sich dessen Isolationszustand in guter Verfassung, so hätte ein Fehler zunächst noch nichts zu sagen, denn es kann ja kein Strom zur Erde abfliessen, ohne an irgend einer Stelle zum Netz zurückzukehren, oder der Strom wird so gering sein, dass er zunächst Schaden nicht anrichten kann.

Wenn zwei gleichgrosse Fehler vorhanden sind, wird der Strom an beiden nahezu die gleiche Stärke haben und im Gleichstromnetz wird an der einen Stelle der Strom austreten, die Spannung also positiv sein, an der anderen Stelle zum Netz zurückkehren und hier die Spannung negativ sein.

Sind dagegen viele Fehler vorhanden, die nicht allzu klein und annähernd von derselben Grössenordnung sind, so wird sich bei der Fehlerortsbestimmung am gesamten Netz ein resultierender Fehler zeigen, der etwa in der Mitte des Stromkreises liegt.

Bildet sich ein grosser Fehler aus und treten gleichzeitig eine Reihe kleinerer auf, so ist die Summe der von diesen ausgehenden Strömen gleich demjenigen, welcher an der Fehlerstelle von geringem Widerstand herrscht. Die Fehlerortsbestimmung wird einen Ort festlegen, der in die Nähe des groben Fehlers fällt.

Bei dem Durchgange des Stromes durch die Flüssigkeiten findet eine Zersetzung derselben statt, der freiwerdende Sauerstoff wirkt oxydierend auf den Leiter und bewirkt somit, dass sich der Fehler verringert, da Metalloxyde nicht leiten. Aus diesem Grunde legen wir bei Isolationsmessungen mit Gleichstrom den negativen Pol der Stromquelle an Erde, so dass die an der Fehlerstelle infolge elektrolytischer Vorgänge auftretenden Salze zerstört und der Fehler somit freigelegt wird. Um dem Strom Zeit zu lassen, diesen Einfluss auszuüben, soll er mindestens zwei Minuten gewirkt haben, ehe die Messung vorgenommen wird.

Im übrigen ist die bei der Isolationsmessung als störend empfundene Bildung schlecht leitender Oxyde bei Telegraphenkabeln absichtlich herbeigeführt worden, um eine schlecht erreichbare Fehlerstelle, wenn auch nur vorübergehend, zu isolieren.

Es muss hier noch erwähnt werden, dass die Fehlerstelle selbst Ströme entwickeln kann, wenn zwei verschiedene Metalle in Frage kommen. Diese Ströme machen sich ebenso wie etwa auftretende Erdströme unangenehm bemerkbar. Die letzteren haben ihren Ursprung in Veränderungen des Erdfeldes, welches durch Veränderungen der atmosphärischen Elektrizität stark beeinflusst wird. Je länger die in Frage kommenden Leitungen sind, um so stärker können die Erdströme auftreten, in kürzeren Leitungen sind sie selten bemerkbar.

Es können somit Störungen auftreten, die eine Verbindung der Leiter verschiedenen Potentials untereinander, eine Verbindung des Leiters mit der Erde hervorrufen und schliesslich sei noch ein dritter Fall erwähnt, die Unterbrechung eines Leiters.

Um konzentrische Kabel gegen die verheerenden Wirkungen der statischen Entladungen zu schützen, die infolge von Kondensatorerscheinungen auftreten, werden die Aussenleiter an Erde gelegt, häufig unter Zwischenschaltung von Spannungssicherungen, die, nach Art der Blitzschutzvorrichtungen gebaut, aus gezahnten Metallplatten u. s. w. bestehen, die im gewissen Abstand einander gegenüber fixiert sind. Die Internationale Elektrizitätsgesellschaft in Wien[1]) hat mit diesen Apparaten gute Erfahrungen erzielt, war jedoch gezwungen, in die Erdleitungen Sicherungen einzuschalten, da unter Umständen ein dauernder übermässiger Stromübergang zur Erde stattfand, wodurch die Platten miteinander verschmolzen. Zwar wurde nun eine übermässige Erhitzung der betreffenden Teile vermieden, dafür traten nun aber die Sicherungen häufig in Thätigkeit, ehe der beabsichtigte Spannungsausgleich vollständig durchgeführt war. Zur Vermeidung dieses Übelstandes wurden Automaten konstruiert, die im wesentlichen dieselbe Konstruktion, wie früher erwähnt, aufwiesen,[2]) bei denen jedoch der Luftspalt bei zu starkem Strom durch einen Fallhebel automatisch überbrückt wird. Die Auslösung des Fallhebels erfolgt, wenn der Sicherungsstreifen, der am kürzeren Arm des Hebels angeklemmt ist, durchschmilzt. Durch diese Vorrichtung kann, ohne dauernde Erdung des Aussenleiters, eine sichere Erdverbindung hergestellt werden.

Trotz dieser Vorrichtungen werden sich Fehler in der Isolierung nicht vermeiden lassen, da infolge vagabundierender Ströme die Fehlerstellen erwärmt werden. Tritt dann noch Feuchtigkeit dazu, so wird der Zerstörungsprozess sich nach der Mitte des Kabels zu ausdehnen und auch die Isolierschichten angreifen, welche zwischen dem Aussen- und Innenleiter liegen, wodurch dann aus dem an und für sich geringfügigen Erdschluss Kurzschluss werden kann.

Der Isolationswiderstand eines Kabelnetzes, welches ohne Abzweigungen, Anschlüsse u. s. w. ist, beträgt meistens 100—150 Megohm; die Isolation des gesamten Netzes wird aber sofort ganz wesentlich geringer, sowie Anschlüsse vorhanden sind, da die Apparate selbst einen bedeutend niedrigeren Isolationswiderstand aufweisen. Infolgedessen können auftretende Fehler durch Messungen

---

1) Zeitschrift für Elektrotechnik 1900, S. 27.
2) Hdb. VI, 1: Automaten.

auch nicht ohne weiteres gefunden werden und es wird erforderlich, automatische Melder einzurichten, die in Thätigkeit treten, sobald an irgend einer Stelle Isolationsfehler auftreten. Um dies zu ermöglichen, wird eine besondere Stromquelle von niederer Spannung so angeschlossen, dass der eine Pol mit dem Aussenleiter des Kabels oder, wenn derselbe geerdet ist, mit der Erde verbunden wird, während die Prüfdrähte über besondere Klappen-

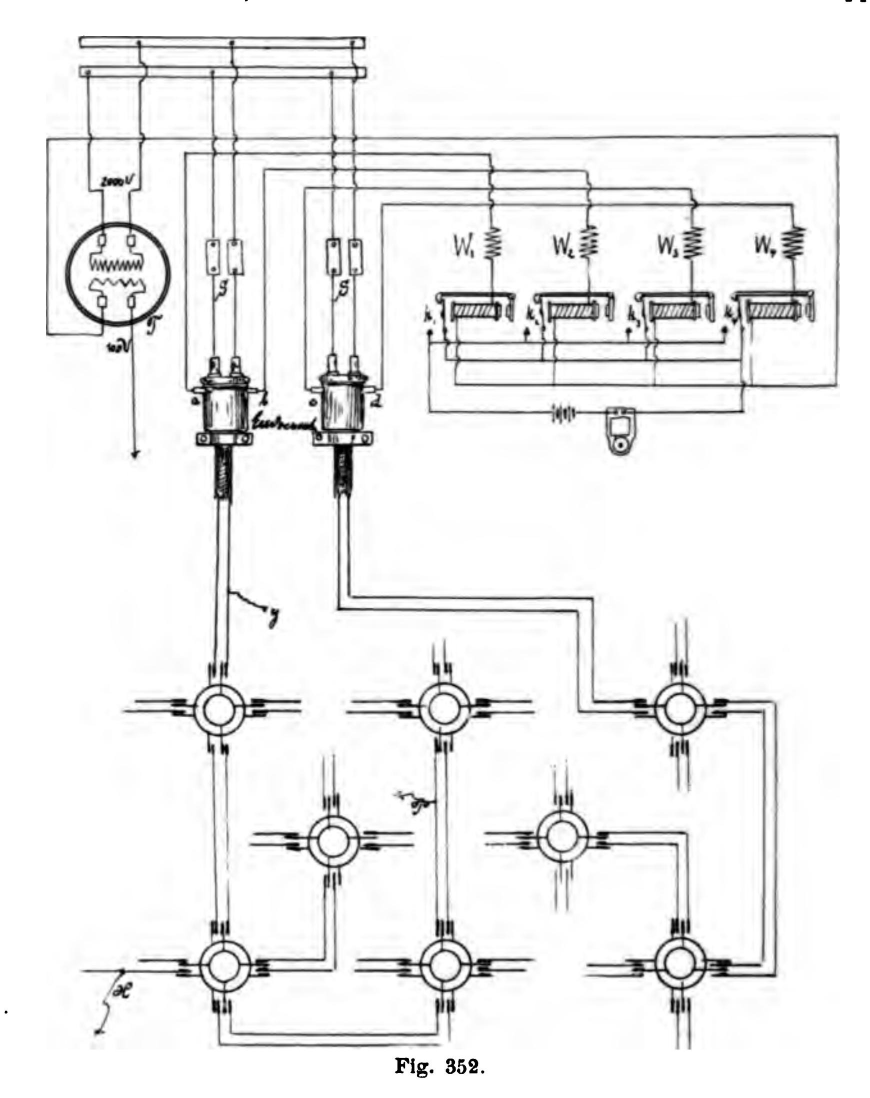


Fig. 352.

apparate hinweg mit dem anderen Pol verbunden werden. Infolge irgend eines Defektes zwischen den äusseren Leitern und den Prüfdrähten, der jedenfalls bei grösseren Isolationsfehlern auftreten wird, findet ein Stromschluss statt, der die entsprechende Klappe in der Centrale in Thätigkeit setzt. Eine derartige Einrichtung hat die Internationale Elektrizitätsgesellschaft in Wien[1]) verwendet. In dem Schaltungsschema Fig. 352 führen die Prüfdrähte *a*, *b*, *c*, *d* u. s. w., wenn sie aus den Endverschlüssen austreten,

1) Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1900, S. 162.

über die Widerstände W_1 W_2 zu den Relais, welche mit Fallklappen k_1 k_2 versehen sind. In einer gemeinschaftlichen Leitung werden sie weitergeführt bis zum sekundären Pol eines Transformators T, dessen zweiter Pol an Erde liegt. Die Prüfdrähte sind in den Schaltkästen Fig. 353 durch ausschaltbare Bleisicherungen geschützt. Ausserdem ist aus der gleichen Zeichnung eine Schaltvorrichtung ersichtlich, welche das eventuelle Eintreten von Wasser in den Schaltkasten automatisch anzeigt. Von der Bleisicherung *e* führt bei *f* abzweigend eine Leitung zu einem ringförmigen Leiter *g*, welcher so in der Vergussmasse des Kabelkastens angeordnet ist, dass er durch diese isoliert ist. Dringt Wasser in den Kabelkasten ein, so wird es eine Verbindung zwischen dem ringförmigen Leiter *g* und durch diesen mit dem Prüfdraht und dem Metallgehäuse herstellen, wodurch der Meldeapparat ebenfalls in Thätigkeit gesetzt wird.

Wenn ein Fehler im Netz auftritt, wodurch, wie bereits früher gesagt,[1]) die Prüfdrähte meist mit verletzt werden, so würden, wenn der Fehler bei *y* stattfindet, beide Prüfdrähte beschädigt und somit die Klappen 1 und 2 in

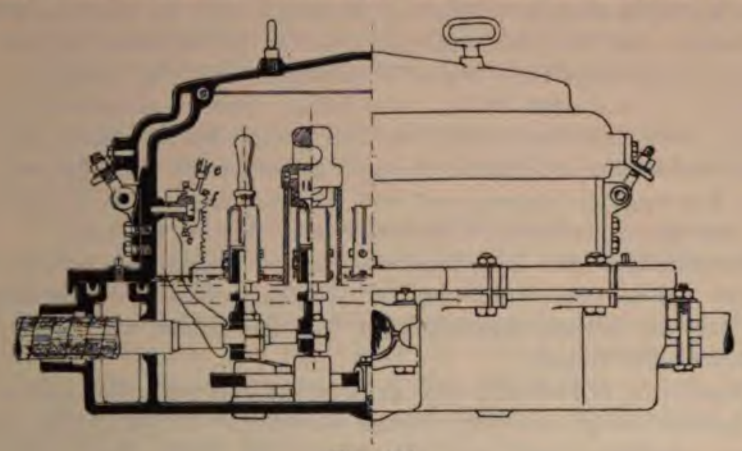


Fig. 353.

Thätigkeit gesetzt werden. Hierdurch ist erkennbar, dass die Störung im ersten Teile des Kabels aufgetreten ist. Findet eine Störung bei *x* und *p* statt, so würde im ersten Fall die Klappe 1, im letzteren die Klappe 2 fallen. Da auf diese Weise das Kabelnetz in drei Abteilungen geteilt wird, so ist von vornherein die Fehlerstelle auf einen bestimmten Teil des Kabelnetzes fixiert, die genaue Feststellung erfolgt dann, nachdem sie abgeschaltet ist, mit Hilfe der üblichen Isolationsmessmethoden.

221. Kurzschluss.

Tritt Stromübergang zwischen zwei Leitern ein, so werden an der betreffenden Stelle sich in der Regel so starke Ströme bilden, dass die vorgeschalteten Sicherungen in Funktion treten, so dass man an ihnen leicht erkennen kann, wo die Störung erfolgt ist; im übrigen sind Methoden zur Bestimmung solcher Fehler an anderer Stelle des Handbuches angegeben. Der Kurzschluss zeitigt auch bei richtiger Wahl der Sicherungen keine Gefahr, sind doch aus diesem Grunde Installationen mit Rohren sehr sicher, wenn beide Leiter in dasselbe Rohr eingezogen werden. Wird bei diesen Leitungen dann die Isolierung angegriffen, so erfolgt durch den auftretenden

1) Hdb. VI, 1: Prüfdrähte, Prüfdrahtkabel.

Kurzschlussstrom ein rasches Abschalten des kranken Teiles. Kurzschlüsse treten am häufigsten in Schaltanlagen offen auf, wo sie sofort entdeckt werden können, da zumeist Bedienungspersonal zugegen ist. Indessen können durch leitende Adern in den aus Schiefer oder Marmor bestehenden Platten der Schalttafeln beträchtliche Stromübergänge zwischen den Leitern stattfinden, ohne dass es immer leicht ist, den Fehler, der sich meistens nur durch unsichere Anzeichen bemerkbar macht, zu entdecken. Auch Oberflächenleitung kann an Schalttafeln in starkem Masse auftreten, wenn die Platten nicht allseitig poliert sind und sich an der rauhen Fläche Feuchtigkeit niederschlagen kann.

Erwähnt seien noch die Kurzschlüsse, die infolge von Resonanzerscheinungen auftreten und an anderer Stelle eingehend behandelt sind.[1])

222. Erdschluss.

Der Stromübergang von einem Leiter zur Erde, der Erdschluss, ist eines der häufigsten Übel in einer Anlage. In Kabelnetzen, die an und für sich vorzüglich isoliert sind, tritt er infolge mechanischer Verletzungen, Pickenhiebe u. s. w. auf. In Bergwerken können die Gesteinsverschiebungen starke Schädigungen hervorrufen, die auch dann nicht ganz unmöglich werden, wenn die Kabel beweglich aufgehängt werden, damit sie den Verschiebungen folgen können. An den Einführungsstellen von Kabelkästen, Muffen u. s. w. kann durch Undichtigkeiten Wasser eindringen und zum Erdschluss führen, ganz abgesehen von den Fällen, wo infolge eines Fabrikationsfehlers der Bleimantel porös und durchlässig ist. Die infolge der Fabrikationsart hygroskopische, unter dem Bleimantel liegende Isolierschicht aus Faserstoff nimmt dann die Feuchtigkeit begierig auf und dringt sehr weit im Kabel vor, hier weit ab von der eigentlichen Fehlerstelle neue Fehler bildend.

In Freileitungen und Hausinstallationen sind Erdschlüsse weniger häufig; in ersteren infolge der Wahl besserer Isolierkörper und der wesentlich geringeren Zahl der Befestigungsstellen, in letzteren infolge der meist trockenen Beschaffenheit der Räume.

Dagegen sind in Fabriken und Akkumulatorenräumen Erdschlüsse häufig. In den ersteren hängt dies eng mit den betriebenen Fabrikationen zusammen, nicht zum mindesten trägt aber hier auch die häufig sehr schlechte und einem Laien überlassene Wartung der Anlage das Ihrige dazu bei.

223. Leitungsbrüche.

Die dritte Art der Fehler, die Unterbrechung, kann einmal durch den Bruch einer Leitung und durch die Lösung einer Verbindungsstelle entstehen. Der erste Fall tritt verhältnismässig selten ein und meistens nur in Freileitungen bei Stangenbrüchen oder Rauhreif, da die Querschnitte und die Entfernung der einzelnen Befestigungsstellen voneinander im übrigen so gewählt werden, dass zu grosse Belastungen kaum auftreten können.

Lösung von Verbindungsstellen tritt ein, wenn Löt- oder Schraubstellen auf Zug beansprucht werden, auch werden wohl ab und zu die Verbindungsstellen in unterirdisch verlegten Kabelnetzen dadurch auseinandergerissen, dass aus irgend einer Ursache, vielleicht durch den Transport sehr schwerer Wagen, auf die eine Seite des Kabels ein starker Zug ausgeübt wird.

224. Zulässiger Isolationswiderstand.

Es ist daher nicht nur erforderlich, während des Baues und vor der Inbetriebsetzung einer Anlage ihren Isolationswiderstand zu prüfen, sondern man muss ihn dauernd kontrollieren und auftretende Fehler sofort beseitigen, wenn nicht grössere Zerstörungen auftreten sollen.

---

1) Hdb. VI, 1: Schutzvorrichtungen gegen atmosphärische Entladungen.

Die Ursachen von Isolationsfehlern sind also überaus mannigfach, doch ist einer der häufigsten Fälle, dass Feuchtigkeit und Schmutz eine leitende Brücke bilden. Verrottung der Isoliermaterialien, Bruch von Isolatoren, atmosphärische Entladungen, Zerstörung der Isolierung durch Säuren und Alkalien führen zur Verminderung des Isolationswiderstandes; dazu kommt, dass ursprünglich ganz geringe Fehler unter der Einwirkung des elektrischen Stromes mehr oder weniger schnell vergrössert werden, sei es, dass dies durch Funkenbildung oder Flüssigkeitsleitung oder auch durch elektrolytische Zersetzung geschieht.

Es können Fehler in einem Leitungsnetz längere Zeit bestehen, die sich durch schwankende Isolationswerte bemerkbar machen, während im allgemeinen die Höhe des Isolationswiderstandes genügend ist. Es gelingt aber wegen der Höhe dieses Wertes nicht, den Fehler sicher zu bestimmen. In der Regel pflegen sich dann solche Fehler unter der Einwirkung von Feuchtigkeit plötzlich zu vergrössern und unangenehm bemerkbar zu machen. Auf alle Fälle bedeutet dieser Zustand für ein Elektrizitätswerk einen recht unsicheren Betrieb, da der Durchbruch in der Regel zu Zeiten zu erfolgen pflegt, wo er am störendsten empfunden wird und zieht man es daher häufig vor, einen derart unsicheren Fehler durch Anwendung höherer Stromstärken herauszubrennen.

Welche Isolationswiderstände müssen nun erreicht werden, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten und den Stromverlust in niedrigsten Grenzen zu halten?

Der Stromverlust ist abhängig von dem Umfange einer Anlage; für die zulässige Grösse des Isolationswiderstandes können aber verschiedene Grundlagen geschaffen werden.

Die Frankfurter Elektrizitätswerke berechneten ihn 1896[1]) nach der Länge der verlegten Leitungen und verlangten für 1000 m Drahtlänge mindestens 100000 Ohm. Der Gesamtwiderstand durfte 50000 Ohm jedoch nie unterschreiten. Der Widerstand zwischen zwei Leitungen verschiedenen Potentials musste auf 1000 m Länge mindestens 150000 Ohm betragen.

Nach dem gleichen Prinzip verlangten die Elektrizitätswerke in Hannover und Barmen für je 1000 m einen Isolationswiderstand von 60000 Ohm, für den Gesamtwiderstand einer Installation jedoch mindestens 30000 Ohm und für die einzelnen Teile einer Anlage die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Werte:

Tabelle No. 15.

Bei einer Gesamtlänge der verlegten Leitungen von	Hannover und Barmen	Frankfurt a. M.
unter 200 m	300000 Ohm	300000 Ohm
200 bis 300 m	200000 „	250000 „
300 „ 500 m	100000 „	200000 „
500 „ 750 m	80000 „	150000 „
750 „ 1000 m	60000 „	100000 „
1000 „ 1500 m	40000 „	70000 „
über 1500 m	30000 „	50000 „

1) PESCHEL, Hilfsbuch für die Montage elektrischer Leitungen 1896, S. 219.

Die Berliner Elektrizitätswerke legten zu gleicher Zeit die Anzahl der angeschlossenen Glühlampen oder deren Äquivalente zu Grunde und berechneten den Isolationswiderstand nach der Formel:

$$W = 10000 + \frac{2000000}{n} \text{ Ohm},$$

worin n die der Anzahl der Glühlampen, einschliesslich eines Äquivalentes von 10 Glühlampen für jede Bogenlampe und jeden Elektromotor, darstellt.

Die gleiche Art für die Bestimmung des minimalen Isolationswertes verwendeten die meisten Elektrizitätswerke, nur waren die Zahlenwerte sehr verschieden, z. B. Köln $\frac{1000000}{n}$, Königsberg $\frac{5000000}{n}$ Ohm.

Es herrschten somit bezüglich der zu verlangenden Isolationswiderstände die verschiedensten Ansichten, die erst dann einige Übereinstimmung erreichten, als der Verband Deutscher Elektrotechniker in seinen Sicherheitsvorschriften 1896 eine einheitliche Grundlage schuf. Nach diesen galt bis Ende 1902 für die Bestimmung des Isolationswiderstandes[1]) für Spannungen bis 250 Volt für Hauptleitungen $\frac{1000000}{n}$ Ohm, für jede Hauptabzweigung $10000 + \frac{1000000}{n}$ Ohm, für Spannungen von 250 bis 1000 Volt[2]) für Hauptleitungen $\frac{3000000}{n}$ Ohm, für jeden Hauptabzweig $10000 + \frac{3000000}{n}$ Ohm.

Alle diese Vorschriften litten an einem beträchtlichen Mangel, sie nahmen zu wenig Rücksicht auf die jeweilige Betriebsspannung, von deren Höhe auch die Stromverluste abhängen. Solange die Anlagen ausschliesslich mit 110 Volt betrieben wurden, war dies auch unbedenklich, da dann die verlangten Isolationswerte genügten. Das Bedürfnis nach höheren Werten wurde aber sofort dringend, als man dazu überging, sehr viele Beleuchtungsanlagen mit der doppelten der früher üblichen Lampenspannung und Kraftübertragungen mit dem Hundertfachen dieses Wertes zu betreiben.

Die Berechnung des Isolationswiderstandes unter Zugrundelegung der angeschlossenen Glühlampen konnte schliesslich auch darum zu keinem günstigen Resultat führen, da für jede Bogenlampe und für jeden Motor, sei er nun 2- oder 200 pferdig, ein willkürlich angenommenes Äquivalent von 10 Glühlampen eingesetzt wurde.

Es mussten somit, hauptsächlich im Hinblick auf die durch die Verwendung höherer Betriebsspannungen bedingten Verhältnisse, höhere und in Abhängigkeit von diesen stehende Grundlagen für die Bemessung der zulässig niedrigsten Isolationswerte geschaffen werden.

Diesem Umstande tragen die vom 1. Januar 1903 gültigen Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker Rechnung.[3]) In § 2d wird verlangt, dass der Isolationszustand einer Anlage derart sein soll, dass der Stromverlust auf jeder Teilstrecke zwischen zwei Sicherungen oder hinter der letzten Sicherung bei der Betriebsspannung ein Milliampere nicht überschreitet. Der Isolationswert einer derartigen Leitungsstrecke muss hiernach

1) Sicherheitsvorschriften für elektrische Starkstromanlagen, Berlin 1899, § 17, S. 21.
2) Sicherheitsvorschriften für elektrische Mittelspannungsanlagen, Berlin 1900, § 24, S. 25.
3) Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Starkstromanlagen, Berlin 1902, ETZ 1903, S. 141.

wenigstens betragen: 1000 Ohm multipliziert mit der Voltzahl der Betriebsspannung (z. B. 220000 Ohm für 220 Volt Betriebsspannung).

Dies gilt für Anlagen, deren Spannung 250 Volt gegen Erde nicht überschreitet. Für höhere Spannungen sind die nachfolgenden Isolationswerte[1]) für die gleichen Leitungsabschnitte, wie vorher erwähnt, verlangt:

Bei Spannungen	von	250— 300	Volt	mindestens	250000	Ohm,
"	"	300— 400	"	"	280000	"
"	"	400— 500	"	"	330000	"
"	"	500— 600	"	"	375000	"
"	"	600— 700	"	"	410000	"
"	"	700— 800	"	"	440000	"
"	"	800— 900	"	"	460000	"
"	"	900—1000	"	"	480000	"

Bei Spannungen über 1000 Volt soll der Widerstand mindestens 500 Ohm für jedes Volt höherer Spannung betragen, so dass für 10000 Volt mindestens 5×10^6 Ohm verlangt werden müssen.

Der Elektrotechnische Verein[2]) in Wien bestimmt den Isolationswiderstand eines Leitungsnetzes gegen Erde oder zwischen zwei Teilen derselben Leitung, insoweit Spannungsunterschiede vorkommen, nach der Formel

$$W = 5000 \frac{E}{J},$$

worin E den grössten Spannungsunterschied in Volt zwischen den betreffenden Leitungen, sowohl untereinander wie gegen Erde, und J die Stromstärke in Ampere bedeutet.

Hiernach wird in Beleuchtungsanlagen, deren Betriebsspannung von 110 auf 220 Volt erhöht wurde, der vierfache Isolationswert für die gleiche Anzahl von Lampen verlangt.

In Tabelle No. 16 sind diese Werte zusammengestellt und gleichzeitig zum Vergleich die in einigen anderen Ländern für die gleichen Lampenzahlen bezw. deren Äquivalente verlangten Isolationswerte eingetragen. Um diesen Vergleich zu ermöglichen, musste in Spalte 1 die Annahme gemacht werden, dass für jeden Lampenanschluss durchschnittlich 30 m Leitung erforderlich sind; in Spalte 9 und 10 musste angenommen werden, dass die Lampen von einer Verteilungssicherung abzweigen und etwa zehn an einer Sicherung liegen.

225. Der Isolationswiderstand der Leitungen in gefährdeten Räumen.

Indessen werden sich nicht immer die verlangten Isolationswerte erreichen und auf die Dauer erhalten lassen, und zwar wird dies in den Fällen sein, wo dem Strom ein bequemer Weg zur Erde geboten wird. Es kommt dies überaus häufig in solchen Anlagen vor, die in feuchten Betrieben, Brauereien, Färbereien, Gerbereien, Kühlanlagen installiert sind, in denen sich auf den Isolierkörpern ein feuchter Niederschlag bildet, der unter Umständen auch noch durch Alkalien oder Säuren verunreinigt ist.

---

1) ETZ 1903, S. 148.

2) Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Stromanlagen, Spiess & Co., Wien 1901, § 44.

Tabelle No. 16.

Anzahl der Glühlampen bezw. deren Äquivalent	Elektrizitätswerke				Verband Deutscher Elektrotechniker				Schweizer Elektrotechn. Verein				Elektrotechn. Verein Wien (in die russischen Vorschriften übernommen)				Amerika National Elect. Code
	Berlin	Frankfurt a. M.	Hannover, Barmen	Königsberg					gegen Erde	Leiter gegen Leiter	gegen Erde	Leiter gegen Leiter					
Im Jahre	1895	1895	1894	1893	1896	1900	1903	1903	1900				1891 bis jetzt				1901
Für Spannungen bis					250	1000	110	220	250		über 250		110	220	500	10000	
Grundlage für die Berechnung	$\frac{2000000}{n}$	pro 1000 m verlegte Leitung Ohm 100000 | 60000; Minimalwert Ohm 50000 | 30000; Hier angenommen, dass für jede Glühlampe 30 m Leitung erforderlich sind		$\frac{5000000}{n}$	$\frac{1000000}{n}$	$\frac{2000000}{n}$	Hier ist angenommen, dass die Lampen an einer Verteilungssicherung liegen, so dass für etwa 10 Lampen ein Verlust von 0,001 Amp. auftritt		$\frac{1000000}{n}$	$\frac{2000000}{n}$	$\frac{3000000}{n}$	$\frac{6000000}{n}$	$5000\,\frac{E}{J}$ pro Glühlampe 0·5 A.	pro Glühlampe 0·25 A.	pro Glühlampe 0·5 Amp.		fest angegebene Werte
5	400000	650000	400000	1000000	200000	400000	110000	220000	200000	400000	600000	$1{\cdot}2\times10^6$	220000	880000	10^6	20×10^6	4×10^6
10	200000	330000	200000	500000	100000	200000	110000	220000	100000	200000	300000	600000	110000	440000	500000	10×10^6	2×10^6
25	80000	130000	80000	200000	40000	80000	35000	70000	40000	80000	120000	240000	44000	176000	200000	4×10^6	800000
50	40000	65000	40000	100000	20000	40000	22000	44000	20000	40000	60000	120000	22000	88000	100000	2×10^6	400000
100	20000	50000	30000	50000	10000	20000	11000	22000	10000	20000	30000	60000	11000	44000	50000	10^6	200000
500	4000	50000	30000	10000	2000	4000			2000	4000	6000	12000	2200	8800	10000	200000	25000
1000	2000	50000	30000	5000	1000	2000			1000	2000	3000	6000	1100	4400	5000	100000	25000
1500	1350	50000	30000	3350	650	1300			650	1300	2000	4000	750	3000	3300		12500

Es ist schon beim Entwurf der Leitungsanlage darauf zu achten, dass sämtliche nach feuchten Räumen führenden Leitungen doppelpolig abschaltbar[1]) angeordnet werden, damit die Isolation der übrigen Anlage richtig gemessen und die in feuchten Räumen gefährdeten Stromkreise im gegebenen Moment rasch und bequem spannungslos gemacht werden können. Eine Unterteilung in möglichst viele einzelne Stromkreise erleichtert das Aufsuchen eines Isolationsfehlers und gestattet ohne besondere Betriebsstörung, einzelne Kreise von geringem Umfang im spannungslosen Zustand zu prüfen.

Wenn es nun auch in den meisten Fällen durch die Wahl geeigneten Materials und sachgemässe Montage möglich ist, Installationen in feuchten Räumen so auszuführen, dass der nach den Sicherheitsvorschriften für trockene Räume verlangte Isolationswiderstand erreicht wird, so ist er doch auf die Dauer nicht in gleicher Höhe zu erhalten und müssen diese Räume daher bei Messungen an der Gesamtanlage abgeschaltet sein.

Durch umsichtige dauernde Beobachtung und Instandhaltung derartiger Anlagen muss jedoch dafür gesorgt werden, dass die Isolation so gut wie möglich erhalten bleibt; eine ziffernmässige Angabe, wieweit der Isolationswert in diesen Teilen einer Anlage sinken darf, ohne eine grössere Gefahr herbeizuführen, lässt sich nicht geben, da dies zu sehr von den örtlichen Verhältnissen abhängt. Beispielsweise könnte man in hohen Räumen oder da, wo die Leitungen gegen unbeabsichtigte Berührung absolut geschützt verlegt sind, geringere Werte zulassen, als in solchen, bei denen die Verhältnisse ungünstiger liegen.

Mehr wie in jeder anderen Anlage ist in feuchten Räumen darauf zu achten, dass sich der Stromübergang zur Erde möglichst gleichmässig auf die einzelnen Unterabteilungen bezw. Befestigungsstellen des Stromkreises verteilt, nicht etwa, dass er nahezu an einer Stelle auftritt. Erforderlich ist hier auch die Anbringung von Erdschlussanzeigern, die in Thätigkeit treten, sowie der Isolationswiderstand unter eine gewisse Grenze, etwa 6000 Ohm, gesunken ist, indessen erübrigen sich hierdurch nicht häufige genauere Messungen.

Es ist auch ratsam, so oft es die Betriebsverhältnisse nur irgend erlauben, die nach feuchten Räumen führenden Leitungen abzuschalten, um einerseits Stromverluste zu vermeiden und bei Gleichstromanlagen auch die zersetzende Wirkung des Erdstromes möglichst einzuschränken. Es dürfte auch, ebenfalls in Gleichstromanlagen, empfehlenswert sein, die nach feuchten Räumen führenden Leitungen bei besonders ungünstigen Verhältnissen derart umschaltbar anzuordnen, dass zeitweise der positive, zeitweise der negative Pol an ein und derselben abzweigenden Leitung anliegt, um auch auf diese Weise die elektrolytische Wirkung des Erdstromes teilweise zu kompensieren. In Bogenlichtstromkreisen könnte diese Umschaltung aber nur dann vorgenommen werden, wenn gleichzeitig bei den Bogenlampen die Leitungen vertauscht werden.

Es empfiehlt sich ferner, den häufig als Begleiter der Feuchtigkeit auftretenden Schmutz möglichst zu bekämpfen, indem z. B. in bestimmten Zeiträumen die Isolierglocken, die Sockel der Apparate u. s. w. abgewischt oder abgewaschen werden. Geschieht dies nicht, so wird die betreffende Anlage bald unter der Einwirkung von Schmutz und Feuchtigkeit den Charakter

---

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 198 u. 209; vergl. auch Installationstabelle Hdb. VI, 2 S. 320 u. 321.

einer durchtränkten annehmen, für die dann wesentlich schärfere Bestimmungen in Kraft treten. Ausserdem leiden dann die Isoliermaterialien mehr und werden um so schneller zerstört.

226. Der Isolationswiderstand von Freileitungen.

Auch für Freileitungen ist es schwierig, einen dauernd guten Isolationswiderstand zu erhalten. Hier kommen nicht nur die Witterungseinflüsse in Frage, sondern auch die Verschmutzung der Isolatoren durch die hauptsächlich in Fabrikgegenden in der Luft enthaltenen Verunreinigungen. Während in der Regel Niederschläge den Isolationswiderstand ungünstig zu beeinflussen pflegen, kann in solchen Gegenden starker Regen zur Erhöhung desselben beitragen, da er die Isolatoren reinigt.

Häufige Isolationsfehler in Freileitungsnetzen rühren von zerbrochenen Isolatoren her, deren Defekte in mutwilligen Steinwürfen und Schüssen ihre Ursache haben können, für die die weissen Isolatoren eine gute Zielscheibe abgeben. Durch die Verwendung matt gefärbter Isolatoren, braun und grün, kann diesem, für den Betrieb überaus unangenehmen Unfug sehr gesteuert werden.

Für Spannungen bis 250 Volt muss der Isolationswiderstand für das Kilometer einfacher Länge bei feuchtem Wetter mindesten 20000 Ohm, bei höheren Spannungen mindestens 80 Ohm für das Volt und das Kilometer einfacher Länge betragen, braucht aber $1^1/_2$ Megohm nicht zu überschreiten.

Tabelle No. 17.

Isolationswiderstand von Freileitungen	
bei Spannungen bis	für das Kilometer einfacher Drahtlänge
250 Volt	20000 Ohm
500 „	40000 „
1000 „	80000 „
2000 „	160000 „
5000 „	400000 „
10000 „	800000 „
über 20000 „	1500000 „

227. Prüfung einer Anlage nach Fertigstellung und während des Betriebes.

Vor Inbetriebsetzung einer Anlage muss sie geprüft werden, um festzustellen, ob Isolationsfehler vorhanden sind.[1]) Diese Messungen haben sich einmal auf die Messungen des Isolationswiderstandes gegen Erde zu erstrecken, zum anderen muss aber auch festgestellt werden, dass zwischen zwei Leitern verschiedenen Potentials keine Fehlerstellen bestehen. Zur letzteren Messung ist es erforderlich, dass alle Glühlampen, Bogenlampen, Motore, überhaupt alle Stromverbraucher von ihren Leitungen abgetrennt sind, dagegen alle Beleuchtungskörper, einschliesslich deren Fassungen angeschlossen, alle Sicherungen eingesetzt und alle Schalter geschlossen sind. Reihenstromkreise dürfen jedoch nur an einer einzigen Stelle geöffnet werden, die möglichst nahe der Mitte zu wählen ist.

Ordnungsmässig betriebene Anlagen müssen häufig auf ihren Isolationswiderstand geprüft werden. Diese Messungen müssen in ein nur diesem Zwecke dienendes Buch eingetragen werden, da es nicht nur erforderlich

1) Über die Art der Messungen und die erforderlichen Instrumente vgl. Hdb. II.

ist, den gerade bei der betreffenden Messung gefundenen Isolationswert zu kennen, sondern auch den zeitlichen Verlauf des Isolationszustandes einer Anlage zu verfolgen. Wird hierdurch festgestellt, dass die Widerstände stark schwanken, so kann sicher auf irgend einen Fehler geschlossen werden. Sind z. B. 20 Megohm, das andere Mal nur 5000 Ohm Widerstand beobachtet worden, so ist dies viel unangenehmer, als wenn die Isolation andauernd einen gleichmässigen, wenn auch anscheinend niedrigen Wert zeigt.

Hieraus folgt, dass, wie Dr. C. L. Weber in seinen Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften sagt, „der Isolationswiderstand einer Anlage keineswegs ein unmittelbares Mass für ihre Feuersicherheit ist, wohl aber kann man aus der Kenntnis seiner Grösse unter sachgemässer Berücksichtigung aller obwaltenden Verhältnisse auf indirektem Wege ein Urteil über den mehr oder weniger ordnungsgemässen Zustand der Leitungen und damit zugleich über die Sicherheit der Anlage gewinnen."

Um sichere Resultate zu erhalten ist es aber erforderlich, elektrische Anlagen unter den Betriebsspannungen auf ihre Isolation zu prüfen und ist das Bedürfnis um so dringender, wenn höhere Spannungen verwendet werden. Die Schwierigkeiten, die der praktischen Ausführung zum Teil entgegenstanden, sind durch praktische und interessante Konstruktionen beseitigt, von denen hier ein interessantes Beispiel gegeben sei. Die Compagnie d'industrie électrique de Genève, welche nach dem System Thury eine Gleichstromanlage zwischen St. Maurice und Lausanne mit 20 000 Volt betreibt, hat zu diesem Zwecke eine Gleichstromdynamo gebaut, welche mit einer Klemmenspannung von 25 000 Volt arbeitet und bei dieser Spannung 25 KW abgiebt.

Die zweipolige Maschine sieht einer Wechselstrommaschine mit radialen Magnetpolen ähnlich, besitzt ruhende Armatur und laufende Magnetpole. Sowohl Armatur als Magnetkerne bestehen aus lamelliertem Eisen.

Die aus 48 Spulen bestehende Armatur ist nach Art der Grammeschen Anker gewickelt, ihre Isolierung gegen das Eisen wird durch imprägniertes Papier bewirkt. Jede Spule besteht aus 500 Windungen eines mit Seide umsponnenen Kupferdrahtes von 0·5 mm Durchmesser (0·2 mm² Querschnitt), so dass im ganzen 24 000 Ankerwindungen vorhanden sind, welche einen Widerstand von 700 Ohm besitzen.

Die innere Lichtweite des Armaturkranzes beträgt 580 mm, seine achsiale Länge 300 mm.

Entsprechend der ruhenden Armatur ist auch der Kommutator stillstehend angeordnet und besitzt derselbe, um die Spannung zwischen den einzelnen Segmenten zu vermindern, von diesen die doppelte Anzahl wie Ankerspulen vorhanden sind. Die Isolierung zwischen den Lamellen erfolgt durch Luft.

Die Stromabnahme erfolgt an der im Innern des Kommutators angeordneten Schleiffläche durch zwei rotierende Bürsten, die mit zwei auf derselben Welle sitzenden Schleifringen leitend verbunden sind. Durch zwei auf diesen ruhende Bürsten wird der Strom den Klemmen zugeführt.

Die Erregung erfolgt durch eine besondere Erregermaschine, und zwar ist bei 600 Umdrehungen eine Stromstärke von 8 Amp. bei 80 Volt erforderlich.

Um zu vermeiden, dass am Kommutator Lichtbogen stehen bleiben, ist ein Gebläse angeordnet, welches durch zwei Düsen auf die Enden der

rotierenden Bürsten einen starken Luftstrom schleudert, der etwa entstehende Funken sicher unterdrückt.

Mit dieser Maschine wird die Isolation der Fernleitung St. Maurice-Lausanne geprüft, deren Länge 56 km beträgt. Die Leitungen, welche einen Querschnitt von 150 qmm und einen Gesamtwiderstand von 13,3 Ohm besitzen, sind auf 1500 hölzernen Masten verlegt. Die Isolatoren haben zwei Mäntel, sie sind von RICCARDO GINOVI in Mailand geliefert.

Zur Messung wird ein statisches Voltmeter und ein Milliamperemeter von HARTMANN & BRAUN verwendet. Der eine der Leiter wird an Erde gelegt.

Die Resultate der Messungen an den Hochspannungsfreileitungen zeigt die nachfolgende Tabelle, aus der zu ersehen, dass die Isolation der Spannung indirekt proportional ist.

Tabelle No. 18.

No.	Isolationswiderstand total in Megohm	Isolationswiderstand pro Isolator	Spannung	Pol, an welchem die Leitung liegt	Bemerkung
1	2631	0·877	20 000	negativ	schönes Wetter
2	2220	0·740	20 000	positiv	„
3	0·864	—	20 000	„	schlechtes Wetter
4	1·115	—	10 000	„	„
5	1·177	—	4 000	„	„
6	0·882	—	20 000	negativ	„
7	1.082	—	10 050	„	„
8	1·180	—	4 080	„	„

228. Revisionen. Als vom Verband Deutscher Elektrotechniker aufgestellte Regel gilt, dass in Warenhäusern, Theatern, sowie feuergefährlichen und durchtränkten Räumen, jährlich mindestens einmal, in gewöhnlichen Läden, Betriebsräumen und Bureaux alle drei Jahre und in Wohnungen alle fünf Jahre einmal eine Revision vorgenommen werden muss, bei der auch genaue Isolationsmessungen vorzunehmen sind. Die Feuerversicherungen verlangen häufigere Revisionen und bedingen beim Abschluss von Versicherungen, gleichgültig um welche Räumlichkeiten es sich handelt, eine alljährliche Revision aus.

Wahrscheinlich werden seitens der Betriebsbeamten weit häufiger Messungen vorgenommen werden, ganz abgesehen davon, dass in den Centralen meistens Instrumente angeordnet sind, die die jeweiligen Isolationswiderstände dauernd anzeigen und die mit den übrigen Schaltbrettinstrumenten zeitweise abgelesen und in das Betriebsjournal eingetragen werden. In Anlagen, welche eine höhere Spannung wie 250 Volt gegen Erde führen, ist die Anbringung von Instrumenten, mit denen der Isolationszustand auch während des Betriebes beobachtet werden kann, Vorschrift. Isolationsmessungen sollen möglichst mit der Betriebsspannung vorgenommen werden, oder wenn dies nicht möglich ist, mit einer Spannung von mindestens 100 Volt. Das Messresultat wird dann auf die Betriebsspannung umgerechnet.

229. Rückwirkende Kraft der Sicherheitsvorschriften. Bei Ausarbeitung der Sicherheitsvorschriften ist bereits vom Verband Deutscher Elektrotechniker erörtert worden inwieweit diese rückwirkende Kraft auf bereits ausgeführte Anlagen haben sollen.

Wenn nun die neueren Sicherheitsvorschriften auf ältere Anlagen angewendet werden sollten, würde in den meisten Fällen ein gänzlicher Umbau verlangt werden müssen. Ob dieses Verlangen, welches von den Polizeiverwaltungen und Feuerversicherungsgesellschaften häufig gestellt wird, gerechtfertigt ist, war schon oft Gegenstand lebhafter Erörterungen.

In einer deutschen Stadt hat die Polizeiverwaltung eine ältere Anlage untersucht und gefunden, dass dieselbe in verschiedenen Punkten nicht den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker entspricht. Sie hat daher von dem Besitzer eine entsprechende Abänderung innerhalb einer bestimmten Frist verlangt. Ein von dem Besitzer vorgelegtes Gutachten eines Sachverständigen, mit welchem dieser die Anlage für feuersicher erklärte, wurde nicht anerkannt und es musste, trotzdem die Anlage seit sechs Jahren tadellos funktioniert hat, ein Umbau vorgenommen werden.

Man wird anerkennen, dass alte Anlagen ebenso feuersicher sein müssen, wie die neu ausgeführten, es ist aber die Frage, ob diese Sicherheit in beiden Fällen mit den gleichen Mitteln erreicht werden muss. Bei neuen Anlagen besteht dieses Mittel darin, dass die Sicherheitsvorschriften genau befolgt werden; dieses Mittel hat man aber früher nur in beschränktem Masse anwenden können. Es genügt aber, wenn der Zweck erreicht wird. Ist die Sicherheit einer Anlage durch jahrelangen Bestand erprobt und zeigen sich keine Mängel einer langsam fortschleichenden Verschlechterung, so wird man wohl die alte Anlage weiter fortbestehen lassen können, bis sich gelegentlich eines Umbaues die Anwendung der neuen Sicherheitsvorschriften ermöglichen lässt.

Die Einführung neuer Vorschriften bringt immer gewisse Schwierigkeiten mit sich. Z. B. wird jetzt die Verwendung von Gusseisen in Gebäuden verboten, Säulen müssen feuersicher umkleidet werden, die Entwässerung muss nach besonderen Bestimmungen bewerkstelligt werden, Wohnräume müssen eine gewisse Höhe haben u. s. w.

Es sind dies wertvolle Vorschriften, die bei Neubauten unbedingt erfüllt werden müssen. Sollten diese aber bei alten Häusern verlangt werden, so wäre dies meistens einem Abbruch des Hauses gleichbedeutend.

Mit elektrischen Anlagen verhält es sich ebenso und man kann nicht verlangen, dass die Tausende, vor Erscheinen der Sicherheitvorschriften entstandenen Anlagen nun plötzlich durch neue ersetzt werden sollen. Verlangen muss man aber, dass alte Anlagen keine Gefahr für den Besitzer oder dessen Nachbarn bringen.

Die unbedingte Anwendung der neuen Sicherheitsvorschriften ist also nicht auf alle Anlagen vorzuschreiben, sondern es sind hauptsächlich Anlagen einer peinlichen Prüfung zu unterziehen, bei denen Vorsicht geboten ist (z. B. bei Theatern, Warenhäusern u. s. w.) oder bei denen eine Gefahr zu befürchten ist.

Kommt also ein Sachverständiger zu dem Schlusse, dass die Anlage nicht feuersicher ist, so muss dieselbe auch umgebaut werden. Eine Forderung, durch welche aber lediglich den Bestimmungen der Sicherheitsvorschriften genügt werden soll, trotzdem eine Gefahr nicht nachweisbar ist, hat keinesfalls eine Berechtigung.

Dass im übrigen der Verband Deutscher Elektrotechniker auf diesem Standpunkt steht, geht aus der Holzleistenfrage (ETZ 1903, S. 652) hervor.

Massregeln zur Herbeiführung persönlicher Sicherheit in elektrischen Anlagen.

230. **Vorsichtsmassregeln an elektrischen Maschinen.**

Die stromführenden Teile von Generatoren und Motoren müssen während des Betriebes der zufälligen Berührung entzogen sein. Zu diesem Zwecke werden in der Regel die Zuführungsklemmen von Hochspannungsmaschinen, um die es sich hierbei in erster Linie handeln wird, mit isolierenden Schutzkästen überdeckt. Bei Gleichstromdynamos, die für Bahnbetrieb mit Spannungen bis 1000 Volt arbeiten, wird sich aber eine Abschliessung der stromführenden Teile, wie des Kommutators u. s. w. nicht ermöglichen lassen, es wird aber dafür gesorgt werden müssen, dass die Bedienung derartiger Maschinen nur durch zuverlässiges und bestens instruiertes Personal erfolgt.

Vom Gesichtspunkt der persönlichen Sicherheit kommen für Generatoren und Motoren für höhere Betriebsspannungen zwei Aufstellungsarten in Frage:

> Sie werden isoliert aufgestellt und mit einem isolierenden Bedienungsgange umgeben

oder

> die Gestelle werden geerdet und der die Maschine umgebende Erdboden, sofern er leitet, ebenso wie in unmittelbarer Nähe befindliche Geländer u. s. w. werden an die Erdleitung mit angeschlossen.

Die erstere Art wird verhältnismässig seltener vorkommen, da es meistens bedeutend schwieriger sein wird zumal grosse Maschinen gut zu isolieren, als sie gut zu erden und wird sich auf die Fälle beschränken, wo es sich um kleinere Maschinen handelt oder wo, wie bei dem in der Schweiz viel verwendeten System Thury, eine grössere Anzahl von Gleichstrommaschinen in Serie geschaltet werden, bei geerdeter Aufstellung also ein häufiges Durchbrechen der Isolation befürchtet werden muss.

Bei der zweiten Art muss danach gestrebt werden, die Erdverbindung möglichst gut herzustellen. Eine gute Erdverbindung wird aber ebensowenig durch die tief in die Fundamente eingelassenen Fundamentanker und den direkten Anschluss der Generatorwelle an die Antriebsmaschine, die zwar durch ihre Rohrleitungen mit grossen Wassermengen in Verbindung steht, erreicht, wie durch eine Drahtleitung von geringem Querschnitt. Bei der Wahl des zur Erdung benutzten Leiters wird man auf die Stromstärken Rücksicht nehmen müssen, die gegebenenfalls vom Gestell durch die Erdleitung zur Erde abfliessen können, um zu vermeiden, dass grössere Spannungsdifferenzen zwischen Gestell und Erde auftreten. Man wird daher einen solchen Querschnitt wählen, der zu dem Leiterquerschnitt, der den Strom vom Generator abführt oder dem Motor zuführt, in einem einigermassen annehmbaren Verhältnis steht. Es ist jedoch auch zu beachten, dass, wie früher[1]) auseinandergesetzt wurde, stets ein nicht unerheblicher Übergangswiderstand zwischen Erdungsvorrichtung und Erde besteht, der dazu beiträgt, dass der eventuell auftretende Strom über ein gewisses Mass nicht ansteigen kann.

Mit Rücksicht aber darauf, dass diese Erdleitungen allen möglichen Verletzungen ausgesetzt sind, ist der geringste zulässige Querschnitt 25 mm².

1) Vgl. Hdb. VI, 1 S. 417.

Für genügenden Schutz gegen mechanische, insbesondere aber gegen chemische Einflüsse ist Sorge zu tragen. Bei grösseren Maschinen wird man sich nicht mit einer Erdleitung begnügen, sondern deren mehrere anschliessen. Die Erdleitungen befestige man, wenn irgend möglich, nicht unter den Muttern der Fundamentbolzen, sondern sehe für sie eine besondere Befestigungsschraube vor.

Aussenlager direkt gekuppelter Maschinen, welche nicht mit dem Gestell durch eine Grundplatte in Verbindung stehen, sind durch einen besonderen Draht mit dem geerdeten Gestell zu verbinden. Sehr zu empfehlen ist es ferner, die Wellen solcher Maschinen, die mit sehr hohen Spannungen arbeiten, noch mit der Erdleitung besonders zu verbinden, wobei allerdings eine auf der Welle schleifende Bürste zu Hilfe genommen werden muss. Die zwischen Welle und Lager befindliche Ölschicht isoliert die Welle so gegen das geerdete Gestell, dass zwischen beiden erhebliche Spannungsdifferenzen vorkommen können und auch mehrfach beobachtet worden sind.

Für alle Erdungsleitungen, die meistens aus Kupfer bestehen, werden ununterbrochene Längen verwendet; Verbindungsstellen werden so viel wie irgend möglich vermieden, erforderlichenfalls aber nur durch eine sehr sorgfältige Lötung hergestellt.

Befinden sich in einem Gebäude mehrere Erdleitungen, so müssen dieselben durch Kupferdrähte von dem gleichen Querschnitt, welchen die eigentlichen Erdleitungen haben, miteinander verbunden werden.

231. Schutzmassregeln an Transformatoren.

Transformatoren werden in elektrischen Betriebsräumen in vielen Fällen ohne Schutzgehäuse aufgestellt, ausserhalb derselben dagegen mit allseitig geschlossenen eisernen Gehäusen umgeben, die genau so geerdet werden müssen, wie dies für Generatoren im Vorstehenden verlangt wird. Die ab und zu vorkommende Aufstellung der Transformatoren auf hohen Säulen gestattet eine Abweichung von der Regel, da sie dann jeder Berührung durch Unbefugte entzogen sind. Die in Hausinstallationen aufgestellten Transformatoren können, wenn man die Gestelle nicht erden will, oder eine gute Erdverbindung zu erzielen nicht möglich ist, durch Schutzverschläge abgeschlossen werden. Auf alle Fälle muss jedoch an dem Gestell bezw. Gehäuse jeden Transformators eine Vorrichtung angebracht sein, welche es gestattet, dasselbe bei Vornahme von Arbeiten am Transformator an Erde zu legen. In der Regel wird hierfür ein Schalter angeordnet werden müssen, der es ermöglicht, die Erdverbindung vorzunehmen, ohne vor Herstellung der Ableitung das Gehäuse berühren zu müssen. Für Transformatoren zu Messzwecken sind diese Vorsichtsmassregeln nicht erforderlich, da es immer möglich sein wird, sie vom Netz ganz abzutrennen, wenn an ihnen gearbeitet werden soll.

232. Schutzmassregeln in Akkumulatorenräumen.

In Akkumulatorenräumen muss in zweifacher Beziehung auf das Bedienungspersonal Rücksicht genommen werden. Einmal darf die Anordnung der Elemente nie so erfolgen, dass zwei Punkte ohne weiteres gleichzeitig berührbar sind, zwischen denen eine höhere Spannung wie 250 Volt besteht, zum anderen müssen die schädlichen Einwirkungen von Säure und Bleisalzen vermieden werden.

Dem ersten Verlangen wird in den meisten Fällen dadurch entsprochen, dass durch die räumliche Anordnung der einzelnen Zellen die Endpunkte, zwischen denen also die höchste Spannung besteht, so weit wie möglich auseinandergelegt werden. Wo sich dies jedoch nicht ermöglichen lässt, kann

auch durch die Anbringung fester isolierender Platten (Glas) zwischen den gefährlichen Stellen ein genügender Sicherheitszustand geschaffen werden.

Während der Ladung schlagen sich Säuretropfen auf den Zellen, Wänden und Gestellen nieder und vermitteln häufig einen Stromübergang zur Erde. Es können daher sehr leicht zwischen einzelnen Stellen des Fussbodens und den Zellen Spannungen auftreten, die gefährlich werden können, wenn die Batterie für eine 250 Volt übersteigende Spannung bestimmt ist. Infolgedessen müssen derartige Batterien mit isolierenden Bedienungsgängen umgeben sein.

Säure- und Bleivergiftungen kommen in Akkumulatorenbetrieben[1]) sehr selten vor und können bei genügender Reinlichkeit so gut wie ganz vermieden werden. Vor allem ist der Genuss von Speisen und Getränken in Akkumulatorenräumen zu unterlassen. Diese Bedingung ist leicht zu erfüllen, da diese Räume nur selten betreten werden. Die während der Ladung beim Kochen der Elemente mitgerissenen Säureteilchen reizen zum Husten, haben aber gar keine schädlichen Folgen, vorausgesetzt, dass reine Schwefelsäure verwendet wird. Beim Mischen der Säure mit Wasser muss die Säure dem Wasser zugesetzt werden, nie umgekehrt.

233. Schutzmassregeln an Schalttafeln.

Beim Aufbau von Schalttafeln ist dafür zu sorgen, dass der hinter ihr befindliche Raum, der häufig für die Leitungsführung und die Unterbringung aller möglichen Apparate verwendet werden muss, so gross gewählt wird, dass sich der bedienende Wärter frei bewegen kann. Die in den Sicherheitsvorschriften vorgeschriebenen Entfernungen[2]) sind inne zu halten und vor allem auch die Anordnung der Apparate, welche häufig bedient werden müssen, so zu treffen, dass sie ohne besondere Hilfsmittel, insbesondere ohne Ersteigen von Leitern zugänglich sind und sich, wenn irgend möglich, in handlicher Höhe befinden.

Für Hochspannungsanlagen können zur Sicherung des Wärters zwei verschiedene Schalttafelanordnungen getroffen werden:

> Entweder werden alle Teile, welche unter Spannung gegen Erde stehen, sowohl auf der Vorder- als auch auf der begehbaren Rückseite durch Gehäuse, Schutzkästen und dergleichen gegen Berührung geschützt und gleichzeitig die Schalttafel mit einem isolierenden Bedienungsgang umgeben,

oder

> alle stromführenden Teile, welche nicht das Potential der Erde besitzen, müssen gegen Berührung unzugänglich angeordnet und die nicht stromführenden Teile der der Berührung zugänglichen Apparate untereinander und mit dem Gestelle verbunden sein und sich ferner mit dem umgebenden Fussboden in leitender Verbindung befinden.

---

1) Für Fabriken, welche sich mit der Herstellung von Bleiakkumulatoren beschäftigen, ist zum Schutze der Arbeiter im Reichsanzeiger vom 14. Mai 1898 (vgl. ETZ 1898, S. 330) eine Verordnung des Reichskanzlers veröffentlicht, die in der ETZ 1899, S. 48 näher besprochen wird (vgl. auch Arbeiten aus dem Kaiserl. Gesundheitsamte, Bd. XV, Heft I). Beide haben insofern hier Interesse, als sie teilweise auch bei der Montage der Batterien zu beachten sind. — Vgl. auch S. 376 dieses Bandes: „Schutzmassregeln gegen Bleivergiftung bei Kabelarbeiten".

2) Hdb. VI, 2, S. 3, Schalttafeln. Sicherheitsvorschriften für Niederspannung § 4b, für Hochspannung § 4b, Abs. 3.

Die erstere Anordnung wird häufig so getroffen, dass die Instrumente hinter Glastafeln montiert werden (Fig. 1); die Messinstrumente erhalten zuweilen Kappen aus Isoliermaterial (Hartgummi oder dgl.). Der isolierende Bedienungsgang kann aus einem hölzernen Podium, welches unter Umständen auf Isolierglocken montiert wird, bestehen, oder es werden Gummimatten von ausreichender Stärke und guter Qualität verwendet.

Die zweite Anordnung verlangt dagegen, dass alle Metallteile der Schalter, Instrumente u. s. w., welche keinen Strom führen, untereinander und mit dem Bedienungsgang leitend verbunden sein müssen, da diese Teile hohe Ladungsspannungen annehmen können. Die Verbindung mit dem Bedienungsgang hat natürlich nur dann Zweck, wenn er selbst leitet; vorteilhaft ist es sogar, wenn er möglichst gut leitend hergestellt wird, damit der Zweck der Anordnung, das Bedienungspersonal auf dasselbe Potential zu bringen, welches die nicht stromführenden Metallteile besitzen, selbst wenn dieses vom Erdpotential abweicht, vollständig erreicht wird. Eiserne Unterlagen, oder das Einbetten von Drahtgeweben in die Fussböden u. s. w. können hier zweckentsprechend sein. Wenn irgend möglich, wird man die untereinander verbundenen Metallteile gut erden und wäre dann auch die Möglichkeit, dass jemand beim Übertreten vom Fussboden des Maschinenraumes nach dem metallischen Teil desselben Punkte gleichzeitig berühren kann, zwischen denen eine erhebliche Spannungsdifferenz besteht, ausgeschlossen. Das Anhängen von Kleidern und Plakaten, Aufbewahren von Materialien, wie Putzwolle u. s. w. auf, an oder hinter der Schalttafel und deren Apparate ist unbedingt zu vermeiden. Auch wenn Schalttafeln in Werkstätten oder anderen Räumen augenblicklich unbenutzt sind, sollen dieselben nicht durch Schränke, Anhäufen von Material, Werkzeugen u. s. w. verstellt oder verdeckt werden.

Sobald einzelne Leitungsstromkreise für den Betrieb nicht mehr gebraucht werden, sind dieselben durch die zugehörigen Ausschalter möglichst an der Hauptschalttafel oder der Hauptverteilungstafel vom Leitungsnetz abzutrennen und dürfen nicht eher wieder eingeschaltet werden, bis wieder Strom benötigt wird.

An den Verteilungsschalttafeln hat das Ausschalten in der Weise stattzufinden, dass zuerst die Verteilungsschalter für die einzelnen Stromkreise, dann erst der Hauptschalter in Funktion gesetzt wird.

Das Einschalten hat dann in umgekehrter Folge zu geschehen.

234. Schutzanordnungen durch die Konstruktion der Apparate.

Bei der Konstruktion von Sicherungen,[1]) Schaltern[1]) u. s. w. ist eine weitgehende Rücksichtnahme auf die persönliche Sicherheit um so eher geboten, als diese am häufigsten bedient werden müssen. Die allgemein gehaltene Bedingung der Sicherheitsvorschriften:

> „Alle Apparate müssen derart konstruiert und angebracht sein, dass eine Verletzung von Personen durch Splitter, Funken und geschmolzenes Material ausgeschlossen ist“

bedingt nun nicht allein eine einwandfreie Konstruktion, an deren Betriebssicherheit die grössten Ansprüche gestellt werden können, sondern sie bedingt auch die Anbringung geeigneter Schutzvorrichtungen, Schutzkappen und dergl. An deren Stelle kann aber die Anbringung der Apparate an solchen Orten treten, die unzugänglich sind, oder doch unter gewissen

1) Näheres siehe Hdb. VI, 1, S. 191 u. 315.

Vorsichtsmassregeln nur von instruiertem Personal betreten werden können. Die vorerwähnte Vorschrift wird noch durch die folgende ergänzt:

> „Die stromführenden Teile aller in eine Leitung eingeschalteten Apparate müssen derart geschützt sein, dass sie der Berührung durch Unbefugte entzogen sind."

Es zielen daher auch alle modernen Konstruktionen darauf hin, alle stromführenden Teile durch Isoliermaterialen zu verdecken, sei es, dass Kappen oder Platten aus Papier, Porzellan, Speckstein oder dergl. in irgend einer Art über den betreffenden Teilen befestigt werden, sei es, dass ganze Gruppen von Apparaten hinter Glasplatten verlegt werden. Auch die Unterbringung der Apparate in eisernen Gehäusen, die dann geerdet werden, entsprechen dem Zweck. In allen Fällen aber, wo eine Abschliessung stromführender Teile nicht möglich ist, wie dies z. B. bei grösseren Hochspannungsschaltern meistens der Fall sein wird, wird durch die Montage der Apparate die durch die oben erwähnten Vorschriften verlangte Sicherheit erreicht werden müssen.

235. Vorsichtsmassregeln in Centralen.

Immerhin muss hierbei eine scharfe Grenze gezogen werden zwischen solchen Teilen einer Anlage, die nur instruiertem Personal zugänglich sind, wie dies bei den Stromerzeugungsstellen fast ausnahmslos der Fall ist, und solchen, die allgemein zugänglich sind. Für die zuerst genannten Räume wenigstens, soweit es sich um Niederspannungsanlagen handelt, muss in Bezug auf die Anbringung aller Apparate, wie auch auf die Wahl der Installationsmaterialien, insbesondere der Leitungen die grösste Freiheit in Anspruch genommen werden, zumal viele Konstruktionen für alle möglichen Räume gut verwendbar, für die Centralen aber aus den mannigfachsten Gründen, die hauptsächlich durch Betriebsrücksichten bedingt sind, nicht annehmbar sind. Dasselbe gilt sinngemäss von der Verwendung blanker Leitungen.

Aber auch für die Stromerzeugungsanlagen für hochgespannte Ströme dürfen dem Erbauer nur insofern besondere Einschränkungen auferlegt werden, als für das Bedienungspersonal Standorte geschaffen werden müssen, an denen es mit stromführenden Teilen nicht in Berührung kommen kann. — Es werden daher auf den Vorderseiten der Schalttafeln alle stromführenden Teile verdeckt, die Handhabung der Schalter erfolgt durch Gestänge, Kettenübertragungen und dergl. Dagegen werden hinter den Schalttafeln, sowie in Transformatorenräumen und den sogenannten Hochspannungskammern alle Leitungen, die z. B. auch blank verlegt werden können, alle Kontakte u. s. w. nicht geschützt, da an diesen Stellen mit Rücksicht auf eine sichere Betriebsführung die grösste Übersichtlichkeit ein dringendes Bedürfnis ist.

236. Warnungszeichen.

Jedenfalls ist es aber in allen Fällen erforderlich, durch die Anbringung von Warnungstafeln und durch eingehende Information des Bedienungspersonals auf die Gefahr der Berührung unter Spannung stehender Leiter aufmerksam zu machen.

Dies gilt nicht allein für Hochspannungs-, vielmehr auch für Niederspannungsanlagen und bei diesen hauptsächlich dann, wenn es sich um durchtränkte Räume, wie überhaupt um besonders gefährliche Räume oder Stellen handelt.

Führen die Leitungen Hochspannung, so müssen die Warnungstafeln durch einen roten Zickzackpfeil, sogenannten Blitzpfeil besonders kenntlich gemacht werden. Sollen diese Warnungstafeln aber ihren Zweck erfüllen,

so muss eine gewisse Sichtbarkeit verlangt werden, die nur dann erreicht wird, wenn die Tafelgrösse das Format 20 × 10 cm nicht unterschreitet.

In erhöhtem Masse sind warnende Zeichen an solchen Stellen am Platze, die jedermann zugänglich sind. Hierfür dient der bereits erwähnte Blitzpfeil, der an allen Schutzverkleidungen angebracht werden muss, hinter denen Leitungen verlegt sind, die eine höhere Spannung wie 500 Volt gegen Erde führen, ferner an den Masten der Freileitungen, an Gestängen, Konsolen u. s. w. An geeigneten Stellen muss auf die Bedeutung des Blitzpfeiles hingewiesen werden.

237. Schutzmassregeln an Freileitungen.

Freileitungen müssen in einer gewissen Höhe über dem Erdboden geführt und Apparate und Sicherungen, welche in diese einzuschalten sind, so angeordnet werden, dass sie nur mit besonderen Hilfsmitteln zugängig sind. Leitungs- und Stangenbrüche in Hochspannungsanlagen müssen Vorrichtungen in Thätigkeit setzen, welche die Leitungen stromlos machen, um Vorübergehende vor Schädigung zu bewahren, oder die Anordnungen müssen so getroffen sein, dass auch beim Drahtbruch die herabhängende Leitung nicht berührt werden kann, sei es durch die Höhe ihrer Aufhängung, sei es durch darunter angebrachte Schutznetze.[1])

Besondere Vorsichtsmassregeln müssen getroffen werden, wenn eiserne Maste als Träger von Hochspannungsdrähten dienen.[2]) Da schwere eiserne Maste häufig in einen Cementblock eingesetzt werden, so sind sie gegen das umgebende Erdreich mehr oder weniger isoliert, ebenso, wenn sie ohne ein derartiges Fundament in trocknem Erdreich stehen.

Wenn nun z. B. ein Isolator platzt und hierdurch eine Verbindung zwischen einer Hochspannungsleitung und dem eisernen Mast hergestellt wird, andererseits eine zweite Leitung an irgend einer Stelle Erdschluss hat, so können gefährliche Spannungsdifferenzen zwischen dem umgebenden Erdreich und dem Mast entstehen. Das gleiche wird eintreten, wenn Abspanndrähte verwendet sind. Diese können aber auch bei hölzernen Masten gefährlich werden, da sie wenig unter den Isolatorstützen befestigt werden und bei feuchtem Wetter der Strom sich leicht einen Weg über das feuchte Holz vom Isolatorträger nach dem Abspanndraht bahnen kann.

Abspanndrähte in Hochspannungsanlagen müssen daher gegen die Maste isoliert werden; dies erfolgt durch besonders zu diesem Zweck angebrachte Isolatoren oder durch zwischengeschaltete Isolierstücke, Isolierrollen oder dergl. Gute Dienste können die von der Harburger Gummi-Kamm-Co. hergestellten Spanndraht-Wirbelisolatoren leisten (Fig. 209), die eine vorzügliche Isolierung durch Eisengummi besitzen und gleichzeitig zum Anspannen des Ankerdrahtes dienen.

Für eiserne Maste pflegte man meist eine Erdung vorzunehmen, indessen hat Uppenborn[3]) durch besondere Versuche nachgewiesen, dass durch Erdung eine genügende Sicherheit nicht erreicht wird. Die Versuchsanordnung, die praktisch vorkommenden Fällen entspricht, war derart, dass ein Generator, wie Fig. 354 zeigt, mit einem Pol an Erde, mit dem anderen an einen Mast gelegt wurde, der gleichzeitig durch eine Erdplatte geerdet wurde. Der Generator arbeitete mit 2000 bezw. 3850 Volt. Spannungsmessungen, welche

1) Vgl. S. 192 dieses Bandes.
2) Vgl. auch ETZ 1905, S. 239 und ferner „Über Erdverbindung für Mastenbeschläge an hölzernen Leitungsmasten bei elektrischen Hochspannungsleitungen". ETZ 1905, S. 487.
3) ETZ 1901, S. 371.

zwischen Punkten verschiedener Entfernungen vom Mast und diesem selbst angestellt wurden, ergaben die in den Kurven (Fig. 356) ersichtlichen Werte. Als Abscissen sind die Entfernungen vom Mast, als Ordinaten die bei den verschiedenen Abständen beobachteten Spannungen eingetragen. Es zeigt sich, dass selbst bei geerdetem Mast schon in einer Entfernung von 0·5 m, und zwar bei der niedrigen Betriebsspannung von 2000 Volt eine unter Umständen tödlich wirkende Spannung von 500 Volt besteht.

An diese Versuche knüpft WILKENS[1]) sehr bemerkenswerte Betrachtungen, in denen er ebenfalls darlegt, dass durch die obenerwähnte Erdung ein sicherer Schutz nicht gewährt werden kann. In der Versuchsanordnung (Fig. 355) fliesst einmal ein Strom i_1 vom Generator zum Mast und von diesem über die Erdplatte E_1 zum Generator zurück. Ein zweiter Stromkreis wird vom Mast über E_2 und E_1 gebildet, so dass die Leitung L lediglich einen Stromzuwachs von i_2 erhält, wodurch aber der Zustand des Mastes zu dem ihn umgebenden Erdreich nicht unbedingt eine Änderung durch das Anlegen der Erdplatte E_2 an den Mast M erfahren muss. Eine Erdung in dieser Weise kann daher nur dann einen Schutz gewähren, wenn durch den Strom i_2 eine Abschaltung der mit dem Mast in Kontakt getretenen Leitung L bewirkt, bezw. die letztere stromlos oder spannungslos gemacht wird.

Das einfachste Mittel, um derartige Leitungen stromlos zu machen, wäre, den resultierenden Strom i_2 selbst zur Abschaltung heranzuziehen, sei es durch die Wahl geeigneter Automaten oder Sicherungen. Eine genügende Sicherheit wäre aber hierdurch nicht gegeben, trotzdem durch derartige Erdschlüsse häufig sehr hohe Stromstärken fliessen. So wurde an einem Strassenbahnmast in Aachen[2]) bei trockenem Wetter ein Strom von 50 Amp. beobachtet, der bei feuchtem Wetter auf 150 Amp. anstieg. Trotzdem kann es aber infolge der Selbstinduktion der Leitungen und der geringen Zunahme der Stromstärke beim Kurzschliessen der Wechselstromleitungen vorkommen, dass die Sicherungen nicht durchgehen und der Leitungsträger bleibt unter hoher Spannung. Ist der Erdleitungswiderstand gering, so ist es wahrscheinlich, dass der Fehler bald gefunden wird. Anders jedoch, wenn derselbe eine beträchtliche Höhe besitzt. Häufig wird man dann auf die Leckage erst durch einen Unglücksfall aufmerksam.

Die Erdung muss also so gut wie irgend möglich hergestellt werden, indessen ist es, wie wir an anderer Stelle[3]) gesehen haben, praktisch äusserst schwer, einen Erdungswiderstand zu erreichen, der unter 20 Ohm liegt, und müssten daher möglichst alle Erdplatten desselben Netzes durch eine besondere Leitung parallel geschaltet werden und die Oberfläche der Erdplatten muss so viel wie möglich vergrössert werden. In ausgedehnten Fernleitungsnetzen wird sich dies der Kosten wegen selten ermöglichen lassen, ganz abgesehen davon, dass durch mechanische und chemische Einflüsse die Verbindungsleitung beschädigt und unterbrochen werden kann, wodurch ihr Zweck naturgemäss verfehlt sein würde.

Es giebt nun zwei Wege, um der den Menschen drohenden Gefahr unter Hochspannung stehender Eisenmasten zu begegnen. Den einen geben die

---

1) ETZ 1902, S. 1129.
2) ETZ 1901, S. 372.
3) Hdb. VI, 1, S. 417.

Sicherheitsvorschriften[1] an, und zwar für den Fall, dass eine gute Erdung nicht erreicht werden kann. „Eiserne Maste müssen mit einer 2 m über den Erdboden reichenden vom Mast abstehenden hölzernen Schutzverkleidung

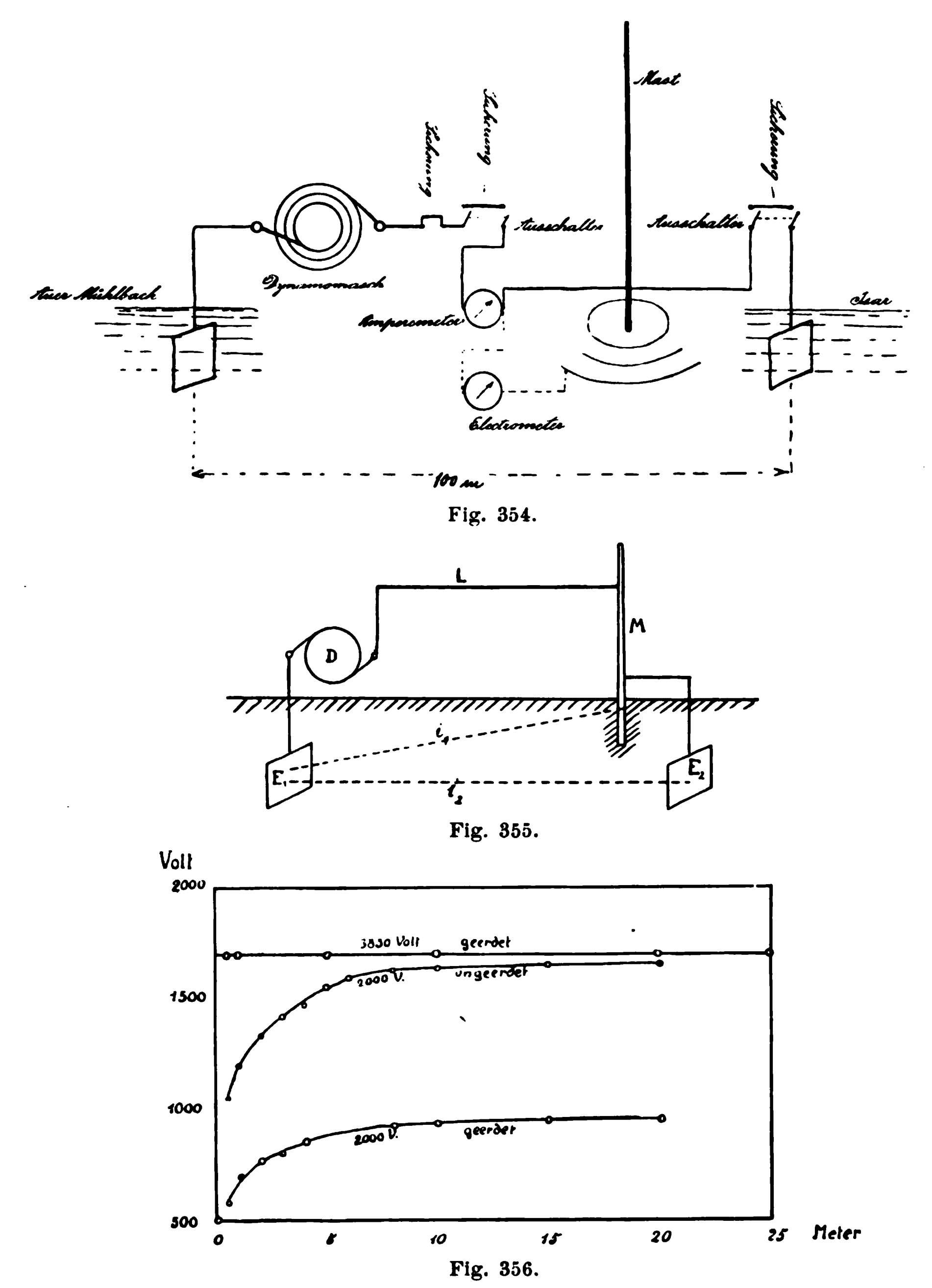


Fig. 354.

Fig. 355.

Fig. 356.

umgeben werden.“ Diese hat den Zweck, eine unbeabsichtigte Berührung des Mastes selbst zu verhindern und auch bei feuchter Witterung einen

1) **Sicherheitsvorschriften für die Errichtung elektrischer Anlagen, Hochspannung § 23 r.**

solchen Widerstand in den über einem menschlichen Körper gebildeten Stromkreis einzuschalten, dass eine Schädigung desselben nicht mehr erwartet werden kann.

Einen anderen Weg wählt WILKENS,[1]) der ebenfalls von der Thatsache ausgeht, dass eine gute Erdung schwer zu erreichen und selbst, wenn sie erreicht ist, gefährliche Spannungen nicht ausschliesst. „Bekanntlich treten in einem Widerstand dadurch Spannungsdifferenzen auf, dass derselbe von einem Strom durchflossen wird. Die Grösse der Spannungsdifferenz längs des Widerstandes ergiebt sich von Längenelement zu Längenelement aus dem jeweiligen Produkt von Strom und Widerstand

$$e = i\,w$$

und

$$e = \frac{i}{q}\,l\,c.$$

Da aber $\frac{i}{q}$ die Stromdichte darstellt, so erzielt man eine Verminderung der Spannungsdifferenz zwischen zwei gegebenen, z. B. von einer Person noch berührbaren Punkten einmal durch Verringerung der Stromdichte und andererseits durch Verringerung des spezifischen Widerstandes des Erdreichs. Sorgt man also bei einem Mast für eine grössere metallische Ausbreitung möglichst dicht an der Erdoberfläche, etwa durch eine Metallscheibe oder ein spiralförmig um den Mast gewundenes Drahtseil, ähnlich wie es Fig. 357 zeigt, so kann man durch entsprechende Ausdehnung dieser Platte jede beliebige Sicherheit erreichen. Soll an der Grenze dieser Scheibe, z. B. zwischen den Punkten 1 und 2, woselbst ja nur noch eine gefährliche Spannungsdifferenz auftreten könnte, ein vorgeschriebener Wert nicht überschritten werden, so braucht man nur den Durchmesser der Scheibe so gross zu wählen, bis die im ungünstigsten Fall zu erwartende Stromdichte an dieser Stelle genügend klein ausfällt. Diese Bedingung wird um so leichter erfüllt werden, je günstiger die Bodenverhältnisse für die Erdung sind, weil alsdann der Hauptanteil des resultierenden Erdstromes durch die Erdplatte E in tiefere Schichten der Erde übergeleitet wird."

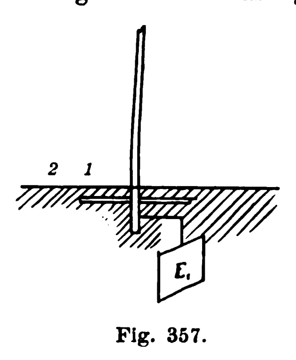


Fig. 357.

Es kennzeichnet sich somit auch hier das Bestreben, diejenigen Punkte, von denen aus eine Berührung von Metallteilen, die eine gefährliche Spannung annehmen können, stattfinden kann, auf das gleiche Potential wie diese zu bringen, wie wir es auch schon auf Seite 355 dieses Bandes vorschlugen. Jedenfalls wird hierdurch eine bei weitem grössere Sicherheit geschaffen, als es durch eine mangelhafte Erdung der Fall sein kann.

Nach in Amerika ausgeführten Versuchen[2]) scheint es auch erforderlich zu sein, an hölzernen Masten von Hochspannungsfernleitungen besondere Schutzmassregeln zu treffen, da auch zwischen nassen Holzmasten und der

1) ETZ 1902, S. 1130.
2) ETZ 1905, S. 239.

Erde gefährliche Spannungsdifferenzen auftreten können. Empfohlen wird um die Maste eiserne geerdete Bänder zu legen. In Norwegen ist diese Anordnung bereits seit einigen Jahren amtliche Vorschrift,[1]) da auch dort durch Versuche[2]) die Möglichkeit einer Gefahr festgestellt worden ist, wobei die Spannungsdifferenz für den laufenden Meter Holzmast mit ungefähr 300 Volt und einer Übergangsspannung zwischen Mast und Erde von 350 Volt festgestellt wurde, wie auch aus der folgenden Tabelle No. 19 hervorgeht, wobei eine Fernleitung, welche eine Spannung von 7000 Volt führte, auf die eisernen Stützer gelegt wurde.

Tabelle No. 19.

Höhe des Metallbandes vom Boden in m	Widerstand zwischen Metallband und Erde in Ohm	Widerstand der Maste oberhalb des Metallbandes in Ohm	Gesamtwiderstand des Stromkreises in Ohm	Stromstärke in den Masten in Milliampere	Spannung zwischen Metallband und Erde in Volt
1	73 000	670 000	743 000	8·76	640
2	101 000	618 000	719 000	9·73	983
3	129 000	580 000	709 000	9·87	1273

Wurden am benachbarten Mast Leitung und Trageisen mit der Erde in der Weise verbunden, dass die ganze Spannung von 7000 Volt von dem Versuchsmast allein aufgenommen wurde, so ergab sich pro laufendes Meter Holzmast ca. 550 Volt und eine Übergangsspannung zwischen Mast und Erde von 650 Volt.

Im übrigen wird bezüglich der Massnahmen zur Erzielung eines genügenden persönlichen Schutzes auf die Ausführungen im Kapitel „Freileitungen" verwiesen.

238. Schutzmassregeln in den Anlagen selbst.

Wesentlich grössere Beachtung als in elektrischen Betriebsräumen muss ausserhalb derselben dem Schutze der Leitungen gewidmet werden, da sie hier in vielen Fällen so verlegt werden müssen, dass sie jedermann zugänglich sind. Blanke Leitungen sind daher auch nur für Spannungen bis 1000 Volt gestattet, über 250 Volt aber auch nur als Kontaktleitungen. Sie müssen aber in allen Fällen, sei es durch Anbringung von Schutzverkleidungen, sei es durch die Art ihrer Anordnung der zufälligen Berührung entzogen sein (siehe Installationstabelle S. 336).

Dasselbe gilt aber auch von isolierten Leitungen, da deren Isolierung, wenn die Betriebsspannung über eine gewisse Grenze steigt, aufhört, einen Schutz gegen elektrische Schläge zu bieten. Häufig werden jetzt Anlagen mit 2 × 220 Volt und geerdetem Mittelleiter gebaut. Infolge der Anordnung des letzteren ist eine höhere absolute Spannung als 220 Volt unmöglich. Dagegen kann eine Berührung der beiden Aussenleiter Personen gefährden. Da nun die Hausinstallationen, mit Ausnahme kleinerer Anlagen, Dreileiter-

1) ETZ 1905, S. 489.
2) Elektroteknisk Tidsskrift, 28. Sept. 1903.

anschlüsse zu erhalten pflegen, ist sehr darauf zu achten, dass in Wohnräume nie gleichzeitig beide Aussenleiter eingeführt werden. Vielmehr sind von den Verteilungspunkten aus, die der Berührung sorgfältig zu entziehen sind, die beiden Aussenleiter möglichst weit auseinander zu verlegen, auf jeden Fall, wo sie nebeneinander herlaufen müssen, sicher in metallüberzogenes Rohr einzuziehen.

Es ist darauf zu achten, dass einfach verlegte Leitungen, also solche ohne Eisen- und Stahlrohr- u. s. w. Verkleidung, nicht durch Tische, Stühle, Leitern u. s. w. beschädigt werden können. Das Anhäufen von Metallabfällen in der Nähe solcher ungeschützten Leitungen ist keinesfalls zu dulden. Auch dürfen ungeschützte Leitungen nicht durch Herüberhängen von Gegenständen verdeckt werden.

Irgend welche Beschädigungen des Leitungsnetzes sind sofort der zuständigen Stelle zu melden, damit geeignete Vorkehrungen zur Verhütung von Kurzschlüssen u. s. w. getroffen werden können.

Elektrische Leitungen dürfen nicht in der Nähe von irgend welchen Heizkörpern oder stark erhitzten Wänden liegen. Werden Heizkörper später angebracht, so sind eventuell die Leitungen anders zu verlegen.

Sämtliche Schutzvorrichtungen, einerlei welcher Art, müssen systematisch auf ihr richtiges Funktionieren revidiert werden.

Blitzschutzvorrichtungen sind öfter zu reinigen und nach jedem Gewitter einer genauen Kontrolle zu unterziehen.

Besonderen Gefahren sind die Arbeiter in sogenannten durchtränkten Räumen ausgesetzt, zu denen alle diejenigen Teile von industriellen und gewerblichen Betrieben gehören,[1]) in denen erfahrungsgemäss durch ungewöhnlich starke oder gutleitende Feuchtigkeit die dauernde Erhaltung normaler Isolation erschwert und der Widerstand des Körpers der darin beschäftigten Personen gegen Erde erheblich vermindert wird.

Hier genügt es nicht nur, die Leitungen dem handlichen Bereich zu entziehen, sie durch Rohre, hölzerne Schutzverkleidungen und dergl. zu verdecken, sondern es muss durch besonders angebrachte Warnungstafeln auf die Gefahr der Berührung aufmerksam gemacht werden.

Weber[2]) sieht ein wesentliches Hilfsmittel zur Verminderung der persönlichen Gefahren in derart ungünstigen Räumen darin, dass die hier herrschende Feuchtigkeit, die in Verbindung mit Schmutz gut leitet, bekämpft wird.

„Auch in Betrieben, welche ätzende Stoffe benutzen, oder bei denen feuchte Räume nicht vermieden werden können, lassen sich vielfach deren schädliche Einflüsse von vornherein einschränken. Gelingt es zum Beispiel, die Räume trocken zu halten, so können auch ätzende Stoffe weder auf die Isolation der elektrischen Einrichtungen, noch auf den menschlichen Körper in so hohem Masse schädlich einwirken, wie bei dauernder hochgradiger Feuchtigkeit. Die Feuchtigkeit selbst kann, wo sie nicht zu vermeiden ist, durch Anlage von Senkgruben, Ablaufrinnen, erhöhte Standplätze, unter Benutzung geeigneten Materials, wie Cement, Asphalt u. s. w. auf bestimmte Grenzen beschränkt werden. Die Benutzung wasserdichter und glatter Fussböden und Wände gestattet auch in Verbindung mit etwas Sorgfalt und Mühe

1) Sicherheitsvorschriften § 43.
2) Erläuterung zu den Sicherheitsvorschriften, Berlin 1905, S. 161.

eine zeitliche Beschränkung des feuchten Zustandes. Mit anderen Worten: Wo es irgend möglich ist, soll man die durchtränkten Räume zeitweise, z. B. jede Woche, gründlich auswaschen und trocknen lassen. Es erscheint auch nicht ausgeschlossen, der Herabsetzung des Isolationswiderstandes dadurch entgegenzutreten, dass man die Körperteile, welche meistens den Stromübergang vermitteln, also namentlich Hände und Füsse entsprechend bekleidet. Wenn auch das Tragen von Handschuhen — die, wenn sie völlig wirksam sein sollen, aus Gummi bestehen müssten — nicht überall durchführbar ist, so dürfte es doch in fast allen Fällen möglich sein, die in Betracht kommenden Personen mit gutem Schuhzeug auszurüsten. Das Tragen von Gummischuhen oder Überschuhen aus Gummi, oder aus Schuhen mit Gummisohlen innerhalb der feuchten Räume kann als ein äusserst wirksames und leicht durchführbares Schutzmittel bezeichnet werden. In bestimmten Fällen wird es sich empfehlen, derartige Fussbekleidung durch Betriebsordnung zu erzwingen."

Hierbei weist Weber auch auf einen Punkt hin, der die weitestgehende Beachtung verdient, das ist die oft starrköpfig festgehaltene Abneigung der Arbeiter gegen irgend welche Schutzmittel, die, wenn auch in ausreichender Anzahl vorhanden, selten benutzt werden, oder sofort abgelegt werden, sowie sie bei irgend einer Arbeit etwas hindern. Häufig kommt noch dazu, dass selten benutzte Schutzmittel nicht genügend in Ordnung gehalten werden, so dass sie, wenn sie wirklich einmal in Benutzung genommen werden, ihren Zweck verfehlen. Bei Revisionen derart ungünstiger Installationen sollte daher auch diesen Schutzmitteln die gleiche Aufmerksamkeit geschenkt werden, wie den zur Installation selbst gehörigen Schutzverkleidungen.

In den weitaus meisten Fällen werden für Glühlichtbeleuchtung Spannungen bis 250 Volt verwendet, es sollte aber, wenn irgend möglich, vermieden werden, in Wohnräume und Fabriken zu diesem Zwecke höhere Spannungen einzuführen. Indessen lässt sich dies nicht immer umgehen. In manchen Industriebezirken werden viele Ortschaften an die Leitungen elektrischer Strassenbahnen angeschlossen, wobei eine entsprechende Anzahl von Lampen hintereinander geschaltet wird. Wäre dies nicht zulässig, so müssten viele Orte auf elektrische Beleuchtung in den Wohnräumen verzichten, da die Aufstellung von Umformern und die damit verbundene Ausbildung von Niederspannungsnetzen der Kosten wegen selten in Frage kommen wird. Immerhin dürfen aber zugängliche Beleuchtungskörper nur dann verwendet werden, wenn die in Frage kommende Spannung 600 Volt nicht überschreitet. Infolgedessen ist die Verwendung hintereinander geschalteter Glühlampen, deren Gesamtspannung höher ist, in Wohnräumen verhindert, da in diesen die Armaturen in den meisten Fällen ohne weiteres zugänglich sein werden. Um aber auch die Gefahren auszuschliessen, die durch Körperschluss zwischen einem Leiter und der metallenen Armatur, wodurch diese unter Spannung gegen Erde gesetzt werden, entstehen können, ist eine Erdung des Beleuchtungskörpers erforderlich und verlangt.[1])

Es sei noch erwähnt, dass es früher allgemein üblich war, die Beleuchtungskörper gegen Erde zu isolieren, weil diese eine stete Quelle von Erdschlüssen waren. Die Ursache war hauptsächlich darin zu suchen, dass für die Drähte keine genügende Öffnung in der Armatur vorgesehen war. Die

1) Sicherheitsvorschriften § 35 k.

Leitungen wurden gewaltsam eingezogen, ihre Isolierung beschädigt und von vornherein ein Körperschluss herbeigeführt, oder doch wenigstens eine schwache Stelle geschaffen, die später den Anlass zu Störungen gab. Diesen Fehler beseitigte die isolierte Aufhängung des Beleuchtungskörpers nicht, er wurde nur verdeckt und konnte bei Isolationsmessungen nicht gefunden werden, dagegen konnte der Metallkörper der Armatur hierdurch unter Spannung gesetzt werden. Von der richtigen Voraussetzung ausgehend, dass nur durch richtige Konstruktion der Beleuchtungskörper und der zur Verwendung kommenden Leitungen eine Besserung erwartet werden könne, schrieb der Verband Deutscher Elektrotechniker bestimmte lichte Rohrweiten für Beleuchtungskörper vor, die bei Niederspannung 6 mm, bei Hochspannung 12 mm nicht unterschreiten dürfen. Bezüglich der Leitungen wurde ein Unterschied zwischen Niederspannung und Hochspannung gemacht und für jene besondere „Fassungsadern“ [1]) geschaffen, deren geschlossene Gummiumpressung eine geringere Wandstärke besitzt, wie die übrigen Gummiaderleitungen. Hierdurch wurde dem grossen Industriezweig, welcher Beleuchtungskörper baut, Erleichterung, trotzdem aber eine grosse Sicherheit geschaffen. Für solche Beleuchtungskörper jedoch, in die Spannungen von mehr als 250 Volt eingeführt werden, müssen Gummiaderleitungen verwendet werden. Aus diesem Grunde erklären sich auch die verschieden verlangten lichten Weiten. Jedenfalls ist aber durch diese Anordnungen ein Sicherheitszustand geschaffen, der früher häufig sehr vermisst wurde.

Fig. 358.

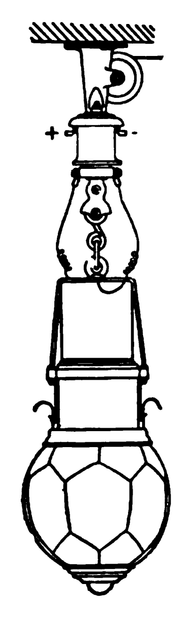


Fig. 359.

Weit häufiger als bei Glühlichtbeleuchtung findet bei der Verwendung von Bogenlicht das Hintereinanderschalten vieler Lampen statt. Infolge der hierbei verwendeten hohen Spannung ist aber die Bedienung derselben und insbesondere das Einsetzen der Kohlen gefahrvoll; in besonders gefährdeten, feuchten oder durchtränkten Räumen bedarf es zudem keiner hohen Spannung. Derartige Lampen dürfen während der Bedienung nicht unter Spannung stehen, und zwar wird zum mindesten die Anordnung allpoliger Ausschalter verlangt werden müssen. Wesentlich besser ist es für viele Fälle, wenn die zur Bedienung herabgelassenen Bogenlampen automatisch abgeschaltet werden. In der Regel geschieht dies durch sogenannte Bogenlampenkuppelungen, deren Verwendung die herunterhängenden Stromzuführungen überflüssig machen und eine feste Verlegung der Leitungen ermöglichen. Beim Herunterlassen der Lampe wird die Kuppelung (Fig. 358 u. 359), die nichts weiter ist, wie ein Steckkontakt, bei welchem der obere Teil fest am Aufhängepunkt, der Stecker oberhalb der Armatur befestigt ist, gelöst und die Lampe kann im spannungslosen Zustand bedient werden.

1) Vgl. Hdb. VI, 1, S. 163 und Sicherheitsvorschriften § 7e.

Vorsichtsmassregeln bei Arbeiten in elektrischen Anlagen während des Betriebes.

1. Bei Niederspannung.

239. Betriebsarbeiten. Schutzmittel für Niederspannung.

Nicht immer werden sich Arbeiten an stromführenden Teilen während des Betriebes vermeiden lassen, da sie häufig mit Rücksicht auf einen geordneten Betrieb erforderlich werden oder zur Vermeidung von Betriebsstörungen vorgenommen werden müssen. Jedenfalls müssen diese Arbeiten auf das notwendigste Mass beschränkt werden. Das unnötige Berühren stromführender Apparate und Leitungen werde vermieden, da auch bei verhältnismässig niedrigen Spannungen eine Schädigung des menschlichen Organismus eintreten kann.

Die Reinigung von Maschinen, insbesondere der Kollektoren, Schleifringe, das Einsetzen von Sicherungen u. s. w. während des Betriebes lässt sich nicht vermeiden, derartige Arbeiten dürfen aber nur von zuverlässigem und gut instruiertem Personal ausgeführt werden. — Überhaupt ist bei der Bedienung elektrischer Anlagen grosser Wert auf ein gutgeschultes Personal zu legen. —

Soweit Reinigungsarbeiten an Maschinen, Apparaten und Leitungen nicht durch den Betrieb bedingt sind, dürfen sie nur im spannungslosen Zustande vorgenommen werden.

Wenn jedoch Arbeiten unter Spannung vorgenommen werden müssen, so sind gewisse Vorsichtsmassregeln zu beachten, die auf eine möglichst gute Isolierung des Arbeiters und der benutzten Werkzeuge hinauslaufen. Die Aufstellung auf isolierende Unterlagen (trockenes Holz, Gummi oder dergl.), die eventuelle Verwendung von Gummihandschuhen genügen für die hier in Frage kommenden Spannungen bis 250 Volt. Um Kurzschlüsse möglichst zu vermeiden, werden blanke stromführende Teile in unmittelbarer Nähe der Arbeitsstelle verdeckt, blanke Leitungen und Schienen auch wohl durch Umwickeln mit Pappe oder Isolierband geschützt. Mutter- und Schaltbrettschlüssel werden mit Isolierband umwickelt, wenn sie nicht von vornherein mit einer Isolierschicht überzogen sind. Schlüssel können mit einem festsitzenden und dauerhaften Überzug von Eisengummi versehen werden. Schraubenzieher werden ebenfalls soweit wie möglich umwickelt. Wo unter diesen Umständen gearbeitet wird, muss für eine ausreichende Beleuchtung gesorgt werden, da jeder Fehlgriff schwere Folgen haben kann.

2. Arbeiten unter Hochspannung.

240. Instruktionen für das Personal.

Wer Hochspannungsanlagen bauen will, muss mit der grössten Sorgfalt bauen, immer eingedenk, dass jede, wenn auch anscheinend geringe Nachlässigkeit schwere Schäden herbeiführen kann, wer aber in derartigen Anlagen unter Spannung arbeiten will, muss mit der grössten Gewissenhaftigkeit und Vorsicht zu Werke gehen. Gerade aber hieran mangelt es häufig, trotz aller den Arbeitern gegebenen Instruktionen und Hinweise auf die Gefahr seitens der Betriebsleiter. Viele, wohl die meisten Unfälle im Hoch-

spannungsbetriebe wären vermieden worden, wenn die Arbeiter sich nach ihren Anweisungen gerichtet hätten.

Sogenannte Hochspannungsräume, in denen Hochspannung führende Leitungen und Apparate ungeschützt und eventuell auch blank in erreichbarer Höhe zugänglich sind, die aber, um den Eintritt von nichtinstruiertem Personal oder von Unbefugten zu verhindern, verschlossen gehalten werden müssen, dürfen während des Betriebes nur von zwei Personen gleichzeitig betreten werden. Auch bei Arbeiten an nichtstromführenden Teilen, am Gebäude selbst, muss ein Sachkundiger anwesend sein; verlässt der eine den Raum, so ist auch der zweite gehalten, hinauszugehen. Auf alle Fälle darf nur instruiertes Personal in derartigen Räumen arbeiten. Handwerker, die nicht Elektrotechniker sind, aber trotzdem während des Betriebes arbeiten müssen, wie Maurer oder dergl., sind vor dem Betreten auf das eingehendste auf die Gefahr der Berührung aufmerksam zu machen.

Zum eigenen Schutze des Betriebsleiters ist es sehr zu empfehlen, die mündlichen Instruktionen in Gegenwart von Zeugen vorzunehmen, eventuell auch durch schriftliche zu ergänzen, über deren Empfang der Betreffende quittiert und hierbei ausdrücklich erklärt, eingehende Informationen empfangen zu haben.

241. Abschaltung, Kurzschliessung und Erdung von Hochspannungsleitungen.

Im allgemeinen darf an irgend einem Teil einer Hochspannungsanlage nur dann gearbeitet werden, wenn derselbe ausgeschaltet, und zwar allpolig ausgeschaltet ist, sich also im spannungslosen Zustand befindet. Gleichzeitig werden aber an der Arbeitsstelle alle Leitungen miteinander verbunden unter gleichzeitiger Erdung der kurzschliessenden Leitung.

Die Abschaltung derjenigen Teile, an denen gearbeitet werden soll, muss in zuverlässiger Weise und von sicher instruiertem Personal erfolgen. Um jedoch Irrtümer auszuschliessen und im Notfalle auch solche Personen in die Lage zu setzen, die Ausschaltungen vorzunehmen, die an und für sich sachverständig, aber die in Frage kommende Schaltung nicht kennen, muss in jeder Schalt- und Transformatorenstation ein genaues Schaltungsschema und ein Übersichtsplan vorhanden sein, mit deren Hilfe man sich sofort orientieren kann. Vorteilhaft und zur Sicherheit beitragend ist es, wenn auf diesem Plan die Reihenfolge der Handgriffe verzeichnet steht, die bei der Ausschaltung und eventuellen Kurzschliessung und Erdung zu beachten sind, falls auch für die letzteren Massnahmen feste Einrichtungen und Schalter vorgesehen sind.

Die Kurzschliessung und Erdung bezwecken, wie der Verband Deutscher Elektrotechniker seine Betriebsvorschriften erläutert,[1]) dem Personal ein Berühren der betreffenden Leiterteile ohne Gefährdung zu ermöglichen. Die Kurzschliessung soll dabei unter anderem bewirken, dass bei irrtümlicher Einschaltung derjenigen Leiterteile, an welchen gearbeitet wird, die zugehörigen Sicherungen abschmelzen und die Leitung dadurch stromlos wird. Da hierbei jedoch die Schmelzsicherung einer Leitung (eines Poles) unversehrt bleiben und letztere somit die Hochspannung gegen Erde behalten kann, so ist die betreffende Leitung ausserdem noch zu erden. Durch diese Erdverbindung kann unter Umständen ein derart starker Strom fliessen, dass auch die letzte Sicherung der geerdeten Leitung funktioniert. Deshalb ist die Erdungsverbindung so herzustellen, dass sie genügende Leitungsfähigkeit besitzt.

1) ETZ 1903, S. 155.

Es ist somit selbstverständlich, dass die zur Kurzschliessung und Erdung verwendeten Leitungen auch thatsächlich einen Querschnitt besitzen müssen, der imstande ist, den etwa auftretenden Strom zu tragen, wobei aber auch die Entfernung der kurzzuschliessenden Stelle von der Stromerzeugungsstelle zu berücksichtigen ist. Es muss jedoch auch hier wieder darauf hingewiesen werden, dass nicht jede „Erdung" ihren Zweck erfüllt.

Weber sagt in seinen Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker:[1]) „Missverständnisse und schwere Schädigungen werden nur dann vermieden werden, wenn man sich darüber klar ist, dass nicht jede beliebige Verbindung mit der Erde als ein vertrauenswürdiges Sicherungsmittel angesehen werden kann.[2]) Eine solche Auffassung, vor der nicht eindringlich genug gewarnt werden kann, würde zu schablonenhafter Ausführung und damit zu grossen Gefahren Anlass geben. Eine Erdung, die die Bedingungen der Vorschriften erfüllt,[3]) dass nämlich der geerdete Gegenstand eine für unisoliert stehende Personen gefährliche Spannung nicht annehmen kann, erfordert eine sorgfältige Berücksichtigung der in jedem Einzelfall vorliegenden Verhältnisse; sie ist oft nur mit sehr grossen Schwierigkeiten in befriedigender Weise ausführbar,[2]) manchmal sogar unmöglich. Unvollkommene Ausführungen werden in vielen Fällen nicht genügen, um die auftretenden Spannungsdifferenzen auf ein ungefährliches Mass herabzudrücken.

Man muss nämlich die Fälle, in welchen die Erdung als Schutz gegen Lebensgefahr in Frage kommen kann, unterscheiden in solche, wo die Erdung nur bestimmt ist, rein statisch induzierte Ladungen auszugleichen oder geringe, etwa über die Oberfläche der Isolatoren hinweggesickerte Elektrizitätsmengen abzuführen, und in andere, bei denen der in der Erdleitung auftretende Strom erhebliche Beträge annehmen kann, so dass das hierbei in der Erdleitung entstehende Potentialgefälle an den von der Erde entfernten Punkten noch Spannungen von gefährlicher Höhe entstehen oder bestehen lässt."

Es wird somit auch hier auf die Schwierigkeit einer sicheren Erdung aufmerksam gemacht und sie ist bei Arbeiten an Hochspannungsnetzen häufig nur unter den schwierigsten Verhältnissen überhaupt ausführbar. In vielen Fällen wird aber die Erdung und Kurzschliessung gar nicht an der Arbeitsstelle vorgenommen werden können, wie dies z. B. längs der über hohe Gebirge ziehenden Fernleitungen der Fall sein kann, wo „Erde" nicht zu erreichen ist, oder bei Arbeiten an Kabelnetzen, Demontage von Kabelmuffen oder dergl., wo eine Kurzschliessung nicht ausführbar ist. Wird aber diese Schutzmassregel, fern von der Arbeitsstelle, an einem Transformator oder einem Verteilungspunkt getroffen, so ist der Arbeitende selbst nicht in der Lage, ihre gute Ausführung zu kontrollieren. Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass sie aufgehoben und Strom in die Leitung gegeben wird, ehe die Arbeit beendet ist. Bei Kabeln ist es ausserdem noch schwierig, zu erkennen, ob das Kabel, an welchem gearbeitet werden soll, auch thatsächlich mit dem identisch ist, welches an anderer Stelle kurzgeschlossen und geerdet

1) Weber, Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften, Berlin 1905, S. 26, Anm. 6.

2) Vgl. auch Hdb. VI, 1, Erdung.

3) § 32, auf den hier Bezug genommen wird, lautet: „Einen Gegenstand im Sinne dieser Vorschriften erden, heisst ihn mit der Erde derart leitend verbinden, dass er eine für unisoliert stehende Personen gefährliche Spannung nicht annehmen kann."

ist. Man kann allerdings auf verschiedene Art, z. B. durch die ETZ 1902, S. 843 beschriebene Induktionsmethode mit ziemlicher Sicherheit feststellen, ob ein Kabel unter Spannung liegt oder nicht. Immerhin ist in allen diesen Fällen so zu verfahren, als wenn die Erdung und Kurzschliessung nicht vorgenommen wäre und es müssen dann die Schutzmittel und Vorsichtsmassregeln angewendet werden, die bei unmittelbarer Arbeit an Hochspannung führenden Leitungen angewendet werden müssen und nachstehend erörtert werden sollen.

Die grosse Gefahr der Arbeit bedingt, dass eine genügende Überwachung derselben stattfindet und ist es daher Pflicht des Betriebsleiters, entweder selbst dabei zu bleiben oder aber einem anderen ausdrücklich die Beaufsichtigung zu übertragen.

Gleichwie bei Niederspannungsanlagen müssen auch die übrigen stromführenden Teile, an denen nicht gearbeitet wird, geschützt werden, damit die unbeabsichtigte Berührung anderer Leitungen oder die gleichzeitige Berührung von Leitungen verschiedenen Potentials vermieden wird.

242. Arbeiten während der Betriebspausen. Verabredung auf Zeit.

Sind Arbeiten während Betriebspausen an einem Hochspannungsnetz oder Teilen desselben ausgeführt worden, so darf die betreffende Strecke erst dann wieder unter Spannung gesetzt werden, wenn es sicher ist, dass die Arbeiter nicht mehr an den betreffenden Stellen arbeiten. Es war eine häufig angewendete Gepflogenheit, dass vor Beginn der Arbeit bestimmte Zeiten verabredet wurden, zu welchen die Einschaltung wieder erfolgen sollte. Die Monteure sollten in solchen Fällen die Arbeit 10—15 Minuten vorher beenden bezw. unterbrechen. Bei der grossen Ausdehnung der Hochspannungsnetze, die den Verkehr zwischen Centrale und Strecke sehr erschwert, wäre ein derartiges Übereinkommen gewiss von Vorteil, wenn nicht verschiedene Umstände einen grossen Nachteil bedingen würden. In erster Linie können bei einer Verabredung auf eine bestimmte Zeit Missverständnisse sehr leicht unterlaufen, die Uhren können differieren; schliesslich muss aber auch damit gerechnet werden, dass der Monteur die z. B. infolge einer Betriebsstörung an den Leitungen bedingte Arbeit nicht genügend schnell fertigstellen kann und bis wenige Minuten vor dem angegebenen Zeitpunkt zu arbeiten beabsichtigt, die Zeit aber verpasst. Es wird daher wohl stets ein Zeitpunkt für die Wiedereinschaltung verabredet, sie erfolgt aber erst dann, wenn eine sichere Meldung darüber eingelaufen ist, dass die Arbeiter zurückgezogen sind. Da sich fast an jeder Fernleitung Telephonleitungen entlangziehen, so können diese Meldungen leicht durch transportable Streckentelephone erfolgen, eventuell können die Fernleitungen selbst zum Telephonieren benutzt werden.

Auch in diesem Fall ist der Betriebsleiter selbst oder ein ausdrücklich von ihm Beauftragter gehalten, diese Meldungen entgegenzunehmen und auf ihre Zuverlässigkeit zu prüfen; ebenso muss er sich auch persönlich davon überzeugen, dass alle Schaltungen in betriebssicherer Weise wiederhergestellt worden sind, insbesondere dass ein Übertritt von Hochspannung in Strecken, welche noch nicht in Betrieb genommen werden können, oder in Niederspannungskreise nicht möglich ist, und dass durch das Einschalten Personen nicht in Gefahr geraten. In verschärftem Masse gilt dies, wenn Neuanlagen in Betrieb genommen werden; in diesem Falle muss eine Begehung und Prüfung der Strecke erfolgen.

243. Einsetzen von Sicherungen während des Betriebes.

Eine Arbeit, die fast regelmässig während des Betriebes vorgenommen werden muss, ist das Einsetzen von Sicherungen. Häufig sind Ausschalter nicht angebracht oder sie sind, um sie selbst zu sichern, so angeordnet, dass

der Strom erst die Sicherung und dann den Schalter passiert. In diesem Fall müssen die Schmelzeinsätze, wenn sie nicht (wie z. B. Fig. 332, Hdb. VI, 1) so ausgebildet sind, dass sie ohne Gefahr mit der Hand berührt werden können,

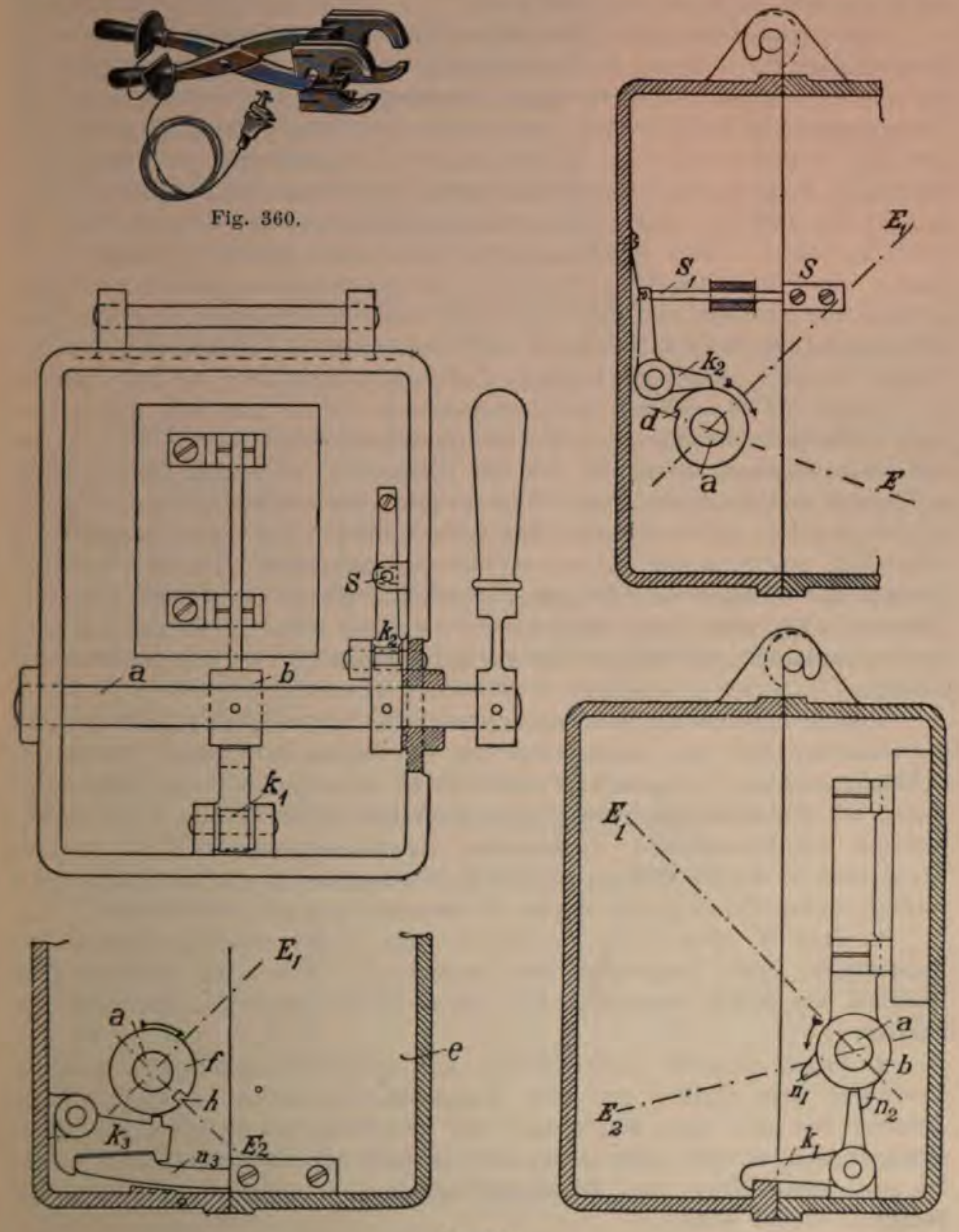


Fig. 361.

mit Isolierzangen gehandhabt werden. Vielfach sieht man in diesen noch nicht den genügenden Schutz und bringt zwischen den isolierenden Griff und den die Sicherung umfassenden Kopf noch dadurch eine geerdete Stelle, dass man ein Metallstück einschaltet (Fig. 360) und dieses durch ein Kupferseil an eine sichere Erdleitung anschliesst (vgl. Fig. 8). Wo viele Sicherungen angeordnet

sind, wird zweckmässig eine geerdete Leitung in nächster Nähe vorbeigeführt, um die an der Zange angebrachte bewegliche nicht zu lang abrollen zu müssen. Hierauf ist stets zu achten, da sonst die zum Schutz angeordnete Leitung zu Kurzschlüssen Ursache geben kann.

SCHUCKERT & Co. haben für solche Fälle, wo es wünschenswert erscheint, insbesondere für Betriebe, in denen häufig Isolationsfehler auftreten und daher die Einsetzung von Sicherungen nicht ungefährlich ist, Schaltkasten mit Verriegelung (D. R.-P. 108387) verwendet. Die Stromzuführung erfolgt zuerst zum Schalter und dann zu den darunter angeordneten und durch eine besondere Thür zugänglichen Sicherungen. Die Achse des Schalters ist nun mit dieser Thür in eine solche Abhängigkeit gebracht, dass sie nur bei offenem Schalter, also spannungslosen Sicherungen geöffnet werden kann. Durch das Öffnen der Thür wird aber die Schalterachse wieder verriegelt, so dass der Schalter so lange nicht geschlossen werden kann, wie die Thür offen steht. Nach dem Schliessen wird der Schalthebel freigegeben, die geringste Drehung seinerseits bewirkt wieder die Verriegelung der Zugangsthür.

244. Gummihandschuhe. Gegen die Einwirkung der Hochspannung schützt man sich, indem man gute isolierende Standorte schafft, die entweder aus starken Gummimatten oder aus hölzernen Gestellen, die auf Isolatoren von hohem Isolationswert aufgestellt sind, bestehen können. Gutes Schuhwerk und übergezogene Gummischuhe erhöhen die Sicherheit. Die Hände werden mit Gummihandschuhen bekleidet, soweit es die Art der Arbeit irgend zulässt. Um dem häufigen Reissen des Gummis vorzubeugen, werden die Handschuhe häufig mit sehr dünnem Leder oder Trikot ausgekleidet, welches auch die im gewöhnlichen Gummihandschuh auftretende lästige Schweissbildung an den Händen verhindert.

Um für Arbeiten an Hochspannungsanlagen ein möglichst gutes Material zu erhalten, hat die „Association des industriels de France" Preise für Schutzhandschuhe[1]) ausgesetzt, welche einen unbedingten Schutz beim Hantieren mit stromführenden elektrischen Leitungen bieten sollen. Von vierzehn zumeist aus Deutschland eingesandten Handschuhtypen wurden, wie die Wochenschrift des niederösterreichischen Gewerbevereins vom 29. August 1901 mitteilt, sechs Typen in die engere Konkurrenz gezogen, und zwar:

1. CHAS. N. HILL & Co. in London: mit Trikot unterlegte Kautschukhandschuhe, deren Finger an den Verbindungen besonders verstärkt sind, während die Nähte äusserlich mit einem Kautschukstreifen überdeckt erscheinen;

2. FRANZ CLOUTH, Köln-Nippes: mit langen Manschetten versehene, gleichfalls über Trikot gezogene Kautschukhandschuhe. Das Trikot ist äusserst fest und seine Nähte sind zur Verhütung des Reissens mit schief geschnittenen Streifen überdeckt; der äussere Kautschukhandschuh jedoch ist ganz ohne Nähte und Zusammenfügungen, wodurch die Widerstandsfähigkeit erhöht wird;

3. GRISON, Paris: mehrere Typen von Lederhandschuhen, welche nach einem speziellen Verfahren dem Kautschuk gleichwertig gemacht werden sollten;

4. CARL LAUX, Neuhaldensleben: Handschuhe aus drei Schichten: Seide, Kautschuk und Hanf, ausschliesslich mit Seide genäht;

1) Bulletin de la Soc. int. des Electriciens, April 1901.

5. SCHNEPPMÜLLER, Magdeburg: Handschuhe, geschnitten aus zusammengeklebten Leder- und Kautschukblättern. Die Nähte sind äusserlich überdies durch eine Kautschuklösung bedeckt, ein zweites Leder überzieht den ganzen Handschuh;

6. Witwe SPECKERS, Zürich: Kautschuk mit Trikotfütterung.

Diese Handschuhe wurden dem Laboratoire central de l'Electricité in Paris zur Untersuchung überlassen, über deren Ergebnisse Prof. JANET im „Bulletin de la Société internationale des Electriciens" vom April 1901 folgendermassen berichtet:

Die Handschuhe wurden sowohl bei niederer als auch bei hoher Spannung, im trockenen und im nassen Zustand untersucht und haben Folgendes ergeben:

I. Messung des Isolationswiderstandes von sechs Isolierhandschuhen verschiedener Fabrikation (bei niederer Spannung).

a) Versuche an trockenen Handschuhen: In den zu untersuchenden Handschuh wurde Quecksilber geschüttet und der Handschuh hierauf in ein Gefäss mit Quecksilber gelegt; hierauf wurde der Widerstand zwischen der äusseren und inneren Quecksilbermasse gemessen. Der Handschuh lag 20 cm tief unter der Oberfläche des Quecksilbers.

b) Versuche an feuchten Handschuhen: Die Handschuhe wurden mit feinem Sand angefüllt, der vorher durch eine wässerige Chlorhydrat-Ammoniaklösung angefeuchtet wurde, und hierauf in feuchten Sand eingebettet; die Dicke der über dem Handschuh befindlichen Sandschicht betrug 20 cm. Man erhielt bei 105 Volt folgende Resultate:

Tabelle No. 20.

Sorte der Handschuhe[1]	Widerstand in Megohm	
	trockene Handschuhe	feuchte Handschuhe
A	0	0
B	0	0
C	540	0
D	4 800	420
E	6 200	24
F	52 500	157

II. Bestimmung der zum Durchschlagen der Handschuhe nötigen Spannung.

Die Versuche wurden bei der vorhin beschriebenen Anordnung der Handschuhe mit Wechselstrom vorgenommen, in der Weise, dass eine Elektrode sich im Innern des untersuchten Handschuhes, die andere in der ihn umgebenden Sandmasse befand.

1) Auf welche der oben angegebenen Firmen sich die einzelnen Buchstaben beziehen, ist nicht bekannt.

Die Spannung wurde allmählich gesteigert, bis man an dem plötzlichen Zurückschnellen des Voltmeterzeigers erkannte, dass der Handschuh durchgeschlagen ist.

Der Handschuh Sorte G, der aus einem Baumwollgewebe bestand, auf welchem Glasperlen aufgenäht waren, konnte nicht auf diese Weise untersucht werden. Zum Zwecke des Versuches wurde er aussen mit Stanniol umgeben und die Spannung zwischen dem äusseren Belag und der inneren Sandfüllung gemessen.

Die Ergebnisse des Versuches sind in folgender Tabelle aufgestellt:

Tabelle No. 21.

Handschuhsorte	Spannung in Volt
A	0
B	0
C	0
D	2·500 bei 3000 Volt durchgeschlagen.
E	1·000 nach drei Minuten durchgeschlagen.
F	11·000 Fünkchen zwischen Handschuh und Sand, 12·000 nach einer Minute durchgeschlagen,
G	unmessbar. Heftige Funken.

245. Hochspannungs-Schutzanzug.

In ganz eigenartiger Weise hat Prof. NIKOLAUS ARTEMIEFF in Kiew einen Schutz gegen Hochspannung geschaffen, der in einem metallenen Schutzanzug besteht. Derselbe wird von den SIEMENS-SCHUCKERT Werken hergestellt und in den Handel gebracht, deren Veröffentlichung über den Schutzanzug die nachstehenden Angaben entnommen werden.

Der Schutzanzug (Fig. 362) besteht aus einem feinen, biegsamen Metallgewebe; er bildet ein zusammenhängendes Kleidungsstück, das den ganzen Körper, auch Kopf, Hände und Füsse einhüllt. Zur Erzielung grösserer Haltbarkeit ist der Metallanzug auf einem Leinenstoffgewand gearbeitet. Er ist so eingerichtet, dass man ihn auch ohne fremde Hilfe anlegen kann; die hierzu erforderlichen Schlitze beeinträchtigen die Wirksamkeit nicht, vorausgesetzt, dass dieselben vorschriftsmässig geschlossen sind. Der Anzug wird über der gewöhnlichen Kleidung getragen. Das Metallgewebe vor dem Gesicht und an den Händen behindert das Sehen und Hantieren in keiner unzulässigen Weise.

Der Schutzanzug kann in zweifacher Hinsicht als Schutzmittel wirksam werden.

Der menschliche Körper wird durch das Metallgewebe kurzgeschlossen. Zwischen zwei Punkten am Körper können keine schädlichen Spannungsdifferenzen auftreten. Der Widerstand des Anzuges ist kleiner als 0·01 Ohm, der des menschlichen Körpers grösser als 200 Ohm, in beiden Fällen von Hand zu Hand gemessen. Es würde danach bei Annahme der genannten Grenzwerte bei Entstehen eines Kurzschlussstromes von 1000 Amp. erst eine Spannung von 10 Volt von Hand zu Hand entstehen und der den Körper durchfliessende Zweigstrom höchstens 0·005 Amp. betragen und somit gänzlich ungefährlich sein.

Mit Rücksicht auf die Erwärmung des Kupfergewebes durch Stromwärme wird man aber noch unterhalb dieses Wertes von 1000 Amp. bleiben müssen, da der Anzug etwa 200 Amp. dauernd und etwa 600 Amp. einige Sekunden führen kann.

Der Schutzanzug verhindert ferner, dass Ladungsströme in den menschlichen Körper eindringen. Man kann deshalb mit dem Schutzanzug bekleidet in einer gut isolierten Hochspannungsanlage jeden beliebigen Punkt ohne Gefahr berühren. Ist die Anlage nicht gut isoliert, so ist die Berührung trotzdem statthaft, wenn man selbst sich gut isoliert, etwa auf einer Hartgummiplatte oder auf einem Brett auf starken Porzellanisolatoren aufstellt. Hierauf bezügliche Versuche sind ausgeführt worden bei Spannungen bis zu 200000 Volt. Voraussetzung ist in beiden Fällen, dass man nicht gleichzeitig verschiedene Pole miteinander verbindet, da es sich dann nicht mehr um den geringen Ladungsstrom, sondern um einen mehr oder weniger hohen Kurzschlussstrom mit Flammenbogenbildung handelt, ein Fall, der im Nachstehenden eingehender besprochen wird.



Fig. 362.

Die Metallhülle schützt also vor Lebensgefahr gegen Hochspannung, weil sie keine tödlichen Ströme in den Körper eindringen lässt; vor Verletzungen durch Verbrennung beim Kurzschliessen grösserer Anlagen wird sie jedoch nicht immer sicher bewahren. Solange Berührung zwischen Hülle und Leitung bestehen bleibt, liegt auch bei Kurzschluss und bei Berührung eines Kabelnetzes von hoher Kapazität keinerlei Gefahr vor, wenn nur der Kurzschlussstrom bezw. der Ladungsstrom in den genannten zulässigen Grenzen (200 Amp. dauernd, 600 Amp. für einige Sekunden) bleibt. Wenn infolge der auftretenden hohen Stromstärke vor Aufhebung der Berührung die Sicherungen schmelzen oder die automatischen Ausschalter den Stromkreis unterbrechen, so bleibt die Hülle unbeschädigt und ebenso der darin befindliche Mensch. Wenn aber die Sicherungen zu träge sind oder die Automaten versagen und die Entfernung der Hülle von der Leitung vor Unterbrechung des Stromkreises erfolgt, so wird sich ein Lichtbogen bilden, durch dessen Wärmewirkung bei genügender Intensität das Gewebe zerstört wird und die Haut Brandwunden erhalten kann.

Bei den Versuchen, bis zu welchen Grenzen Lichtbogenbildung ohne Verbrennungsgefahr noch zulässig sei, schloss Prof. ARTEMIEFF eine Maschine



Fig. 363.

mit 1000 Volt Leerlaufspannung und 200 Amp. Kurzschlussstrom erst mit beiden Händen kurz und unterbrach dann rasch den Stromkreis mit einer Hand. Es trat ein grosser Lichtbogen auf, das Gewebe des Handschuhes verbrannte an einigen Stellen, an der Hand selbst zeigte sich keine einzige Brandstelle.

Bei sehr hohen Spannungen, 150000 Volt und darüber, konnten an einem 20 KW-Transformator bei der geringen Stromstärke ohne Beschädigung des Anzuges nach Belieben eine Leitung oder auch beide Leitungen gleichzeitig berührt werden.

Für die Anwendbarkeit und Benutzung des Schutzanzuges kann man im allgemeinen folgende drei Fälle unterscheiden:

1. Die Maschinen- oder Transformatorenanlage ist so klein, dass selbst bei Kurzschluss der Anlage nur geringe Ströme (1—2 Amp.) auftreten. Der Schutzanzug wird alsdann in keiner Weise beschädigt, das Arbeiten mit demselben ist völlig gefahrlos und der Träger des Anzuges darf sich bewegen, als ob gar keine Hochspannung vorhanden wäre.

2. Die Anlage ist so beschaffen, dass bei einem Kurzschluss zwischen den beiden Polen oder bei Berührung des einen Poles eines Kabelnetzes mit hoher Kapazität Stromstärken zwischen 2 und etwa 30 Amp. auftreten. Es können dann durch den nachfolgenden Lichtbogen Brandstellen an dem Schutzanzug entstehen, sie haben aber nur geringe Ausdehnung, der unter dem Gewebe liegende Leinenanzug wird nicht beschädigt, und der Träger des Anzuges wird nicht verletzt.

3. Bei grösseren Kurzschlussströmen tritt an der Ausgangsstelle des Lichtbogens Zerstörung des Gewebes ein, der Leinenanzug leidet und die darunter liegende Haut kann Brandwunden davontragen. In derartigen Anlagen soll der Träger des Anzuges Vorsicht üben, so dass er die Lichtbogenbildung am Anzug vermeidet. Die Schutzwirkung ist für diese Fälle dahin aufzufassen, dass der Mensch, der ohne Schutzanzug sich der hohen Spannung ausgesetzt hätte, getötet worden wäre, während er, mit dem Schutzanzug bekleidet, voraussichtlich mit dem Leben davonkommen wird, wenn er sich auch mehr oder weniger starke Brandwunden zuziehen kann.

Die zulässige Kurzschlussstromstärke hängt natürlich auch ab von der Art des Gewebes und von der Dauer, während welcher der Lichtbogen an einer Stelle des Gewebes gebildet wird. Für die zunächst in den Handel kommenden Anzüge gelten die vorstehend angegebenen Stromstärken unter der Voraussetzung, dass der Lichtbogen nur kurze Zeit an einer Stelle bestehen bleibt. Die Stromunterbrechung wird meist unwillkürlich schnell vorgenommen werden. Krampferscheinungen in der Hand beim Anfassen einer Leitung treten nicht auf.



Fig. 364.

Der Schutzanzug ist nicht nur in Laboratorien beim Arbeiten mit hohen Spannungen und kleinen Stromstärken verwendbar, sondern er wird bei richtiger Anwendung auch in der Praxis in Hochspannungsanlagen vielfach gute Verwendung finden und wird mehr zu empfehlen sein als Gummihandschuhe und Gummischuhe. Je höher die Spannung ist, um so weniger bequem und zuverlässig wird der Schutz durch diese und um so mehr wird der leitende Metallanzug einen Schutz gewähren. Er gestattet, wenn man die schädlichen Lichtbogen nach dem Anzug hin vermeidet, ohne Gefahr und ohne Betriebsunterbrechung direkt an einer unter Spannung befindlichen Leitung Arbeiten vorzunehmen. Beispielsweise könnte auch bei einem Brande in einer Hochspannungsanlage der den Schlauch bedienende Mann, mit dem Schutzanzug bekleidet, in beliebiger Nähe des Brandherdes mit dem Schlauch und dem metallenen Mundstück hantieren, ohne dass elektrische Ströme von etwa vorhandenen unter hoher Spannung stehenden Leitungen durch den Wasserstrahl auf seinen Körper übergehen.

Als Gebrauchsanweisung sind die folgenden Regeln zu beachten:

1. Der Schutzanzug ist in rissefreiem Zustand zu halten und vor Gebrauch daraufhin zu untersuchen.

2. Beim Anziehen ist die Leinwandunterlage mitzufassen, damit die Kupfergaze nicht reisst.

3. Die Hände sind zuletzt in die Handschuhe zu stecken und danach die Handschuhschlitze zu schliessen.

4. Vor Annäherung an die Hochspannung ist die Kopfhaube überzuziehen und sind die Handschuhe des Schutzanzuges anzulegen.

In Fig. 363 u. 364 schaltet sich Prof. ARTEMIEFF mit seinem Schutzanzug zwischen die Pole eines Wechselstromtransformators für 20 Kilo-Voltampere bei 150000 Volt und 50 Perioden.

In Fig. 364 geht ein Funkenstrom von Pol zu Pol, die Schlagweite deutet die Höhe der Spannung an; ein anderer Funkenstrom geht von einem Pol über den Schutzanzug zum anderen Pol.

In Fig. 363 wird ein zweifacher Funkenstrom von je einem Pol zu einem Arm eingeleitet.

Fig. 362 zeigt einen Schutzanzug über der gewöhnlichen Kleidung zu tragen (normale Ausführung), vorschriftsmässig angelegt zum Gebrauch.

Schutz bei Bleiarbeiten.

246. Bleivergiftungen. Es ist vielfach behauptet worden, dass diejenigen Arbeiter, welche mit der häufigen Verlegung von Bleikabeln und der Herstellung von Anschlussstellen an denselben beschäftigt sind, Bleivergiftungen ausgesetzt seien. Zwar können solche Fälle nicht nachgewiesen werden, es ist aber immerhin eine gewisse Vorsicht geboten. Über die erforderlichen Massnahmen sei auf die Verfügung verwiesen, welche der Staatssekretär des Reichspostamtes zum Schutze der Telegraphenarbeiter gegen die Gefahr der Bleivergiftung an die Oberpostdirektionen ergehen liess:

„Von ärztlicher Seite war der Befürchtung Ausdruck gegeben, dass die mit dem Einziehen unbewehrter Telegraphen- und Fernsprechkabel beschäftigten Telegraphenarbeiter der Gefahr einer Bleivergiftung ausgesetzt seien, weil beim Durchgleiten der Kabel metallisches Blei an ihren Händen haften bliebe. Infolgedessen sind einzelne Oberpostdirektionen veranlasst worden, die Frage zu prüfen und nach Anhörung der Postvertrauensärzte die Notwendigkeit etwaiger Schutzmassregeln zu erörtern; auch haben sich auf Ersuchen mehrere Kabelfabriken zur Sache geäussert. Nach den eingegangenen Berichten ist bei den befragten Stellen zwar noch kein Vergiftungsfall beobachtet worden, obwohl besondere Schutzvorkehrungen nur in seltenen Fällen zur Anwendung gekommen sind; eine unmittelbare Gefahr scheint demnach mit der Handhabung der Kabel nicht verbunden zu sein. Andererseits steht es fest, dass bei ungeeignetem Verhalten der Arbeiter Schädigungen ihrer Gesundheit keineswegs ausgeschlossen sind. Den sichersten Schutz vor Erkrankungen gewährt den Kabelarbeitern die Sauberkeit, insbesondere dürfen sie niemals mit ungereinigten Händen Speisen zum Munde führen. Die Bauführer haben deshalb streng darauf zu achten, dass die Arbeiter eine gründliche Reinigung der Hände mit Seife und Bürste vor dem Essen und bei jeder sonstigen Unterbrechung der Arbeit vornehmen. Für Bereithaltung der nötigen Waschgeräte, einschliesslich der Seife, Bürste und Handtücher, ist auf Kosten der Postkasse Sorge zu tragen. Ferner ist den Arbeitern zu empfehlen, täglich Mund und Nase gehörig auszuspülen und zur Reinigung des ganzen Körpers von Zeit zu Zeit ein Vollbad zu nehmen, was sie auf eigene Kosten zu thun hätten. Um das Blei auch von den Kleidern fernzuhalten, thun die Arbeiter gut, waschbare Arbeitsanzüge oder Überkleider zu tragen. Das Rauchen, Schnupfen und Tabakkauen während der Arbeit erhöht die Gefahr und ist deshalb nicht zu dulden. Arbeiter mit Verletzungen an den Händen dürfen zum Einziehen der Kabel nicht verwendet werden.

Eine Benutzung der Taschenmesser zur Ausführung von Bleiarbeiten ist den Arbeitern nicht zu gestatten. Die von einigen Oberpostdirektionen in Vorschlag gebrachte Beschaffung lederner Handschuhe geht über das Bedürfnis hinaus und erscheint auch deshalb nicht angebracht, weil die Handschuhe das Arbeiten erschweren würden. Dagegen bestehen gegen die Anwendung von Schutzlappen aus grober Leinwand oder auch von Schutzledern zum Bedecken der Hände beim Anfassen der Kabel keine Bedenken. Die sorgfältige Beobachtung dieser Vorschriften, die sinngemäss auch für die mit dem Giessen von Bleiplatten beschäftigten Arbeiter gelten, ist geeignet, der Gefahr einer Vergiftung vorzubeugen. Sollten sich trotzdem bei dem beteiligten Personal Anzeichen einer beginnenden Bleivergiftung zeigen, so ist sofort ärztliche Hilfe in Anspruch zu nehmen."

Schliesslich seien noch die Vorschriften erwähnt, deren Beachtung von der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik verlangt wird:

Unfallverhütungsvorschriften für die Betriebe der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik.

Vorschriften für den Arbeitgeber.

V. Elektrische Betriebe.

247. Unfallverhütungsvorschriften.

Elektrische Anlagen werden je nach der Spannung des erzeugten oder verwendeten Stromes unterschieden in Niederspannungs- und Hochspannungsanlagen.

Niederspannungsanlagen sind solche, bei denen die effektive Spannung zwischen irgend zwei gegen Erde isolierten Leitungen 500 Volt nicht überschreitet und bei denen gleichzeitig die effektive Spannung zwischen irgend einer Leitung und Erde 250 Volt nicht überschreiten kann.

A. Stromerzeugungsanlagen.

60. Generatoren, Motoren und rotierende Umformer, welche nicht staubdicht abgeschlossen sind, dürfen nur in Räumen aufgestellt werden, in denen normalerweise eine Explosion durch Entzündung von Gasen, Staub oder Fasern ausgeschlossen ist. In allen Fällen ist die Aufstellung derart auszuführen, dass etwaige Feuererscheinungen keine Entzündung von brennbaren Stoffen hervorrufen können.

61. In Akkumulatorenräumen darf keine andere als elektrische Glühlampenbeleuchtung verwendet werden. Solche Räume müssen dauernd gut ventiliert sein. Während der Überladung dürfen in diesen Räumen glühende oder brennende Gegenstände nicht geduldet werden.

Die Batterien müssen derart angeordnet sein, dass bei der Bedienung eine zufällige gleichzeitige Berührung von Punkten, zwischen denen eine Spannung von mehr als 250 Volt herrscht, nicht erfolgen kann.

62. Der Zugang zu Hochspannungsanlagen, die durch Warnungstafeln gekennzeichnet sein müssen, darf nur instruiertem Personal gestattet sein und die Spannung führenden Teile müssen so abgegrenzt sein, dass zufällige

Berührung ausgeschlossen ist. Montage- oder Reparaturarbeiten dürfen an solchen Anlagen oder Teilen von solchen erst dann in Angriff genommen werden, wenn der betreffende Teil, an dem gearbeitet werden soll, spannungslos gemacht und geerdet worden ist. (Ausnahmen siehe No. 67.)

63. Prüffelder oder Probierräume sind provisorische Anlagen, zu denen nur besonders beauftragten Leuten der Zutritt gestattet werden darf. Prüffelder unterliegen nicht den vorliegenden Bestimmungen.

64. Zur Kenntlichmachung und Abgrenzung der Prüffelder müssen Warnungstafeln und Wände, Gitter oder Geländer vorhanden sein.

B. Stromverbrauchsanlagen.

65. Bei Motoren, sofern sie nicht in Räumen stehen, die nur instruiertem Personal zugänglich sind, müssen die Spannung führenden Teile gegen zufällige Berührung geschützt sein.

66. Montage- oder Reparaturarbeiten an Hochspannung führenden Teilen des Leitungsnetzes und der Stromverbraucher sowie die Bedienung der Lampen in Hochspannungsstromkreisen ist nur nach vorheriger Ausschaltung und an der Arbeitsstelle selbst vorgenommener Erdung und Kurzschliessung zu gestatten. Wenn, wie beispielsweise bei Kabeln, eine vorherige Erdung unmittelbar an der Arbeitsstelle nicht ausführbar ist, so muss die Arbeit nach No. 67 ausgeführt werden, jedoch braucht der Betriebsleiter oder dessen Beauftragter die Arbeit nicht persönlich zu überwachen.

Die Handhabung von Schaltern, das Auswechseln von Sicherungen sowie in Bahnwagen das Auswechseln von Glühlampen sind nicht als Arbeiten im Sinne dieser Bestimmung zu betrachten, wenn diese Verrichtungen gefahrlos vorgenommen werden können.

67. In unabweisbaren Fällen kann man das Arbeiten an Hochspannung führenden Teilen gestatten; doch ist es Pflicht des Betriebsleiters oder dessen Beauftragten diejenigen Schutzmassregeln anzuordnen, welche den örtlichen Verhältnissen entsprechend zur Sicherheit der Arbeiter nötig sind und die Arbeiter während der ganzen Arbeitszeit persönlich zu überwachen. Sind für solche Arbeiten Gerüste nötig, so finden die Einschränkungen des § 69 keine Anwendung.

Bei Arbeiten an Bahnleitungen, deren Spannung gegen Erde 1000 Volt nicht übersteigt, braucht der Betriebsleiter oder dessen Beauftragter die Arbeit nicht zu überwachen, wenn sie durch instruiertes Personal ausgeführt wird.

68. In jeder Betriebsstätte sind Vorschriften über die Behandlung von Personen, die durch elektrischen Strom betäubt sind, sichtbar anzubringen.

69. Das Aufbauen von Gerüsten in unmittelbarer Nähe von Maschinen und Wellenleitungen sowie von blanken Spannung führenden Drähten (bei Hochspannung auch von isolierten Drähten) darf nur vorgenommen werden, wenn sich die Maschinen und Wellenleitungen im Ruhezustand, die Drähte im spannungslosen Zustand befinden. Nach der Aufstellung kann der Betrieb der Maschinen, Wellenleitungen und elektrischen Leitungen wieder aufgenommen werden, sofern die Gerüste mit solchen Sicherheitsvorrichtungen versehen sind, dass niemand von laufenden Teilen erfasst, noch durch die zufällige Berührung eines Spannung führenden Drahtes beschädigt werden kann.

Die Aufstellung und Benutzung von Turmwagen und Leitern durch instruiertes Personal zur Ausführung von Betriebsarbeiten fällt nicht unter diesen Paragraphen.

70. Turmwagen müssen auf der Plattform ringsherumlaufend ein sicheres Geländer und eine Fussleiste haben. Das Geländer darf zum Umklappen oder Hoch- und Niedrigstellen, auch darf die ganze Plattform mit samt dem Geländer zur Verstellung der Höhenlage eingerichtet sein.

71. Zur Sicherung der Personen, die auf Dächern oder erhöhten Standpunkten, wo Schutzgeländer nicht angebracht werden können, zu arbeiten haben, müssen Sicherheitsgürtel und Seile bereit gehalten und die Arbeitnehmer zu deren Benutzung verpflichtet werden.

Vorschriften für den Arbeitnehmer.

V. Elektrische Betriebe.

73. Die in Prüffeldern Arbeitenden dürfen nur die Verrichtungen ausführen, die ihnen vorgeschrieben sind.

74. Die mittels Wänden, Gitter oder Geländer abgegrenzten und durch Warnungstafeln als gefährlich gekennzeichneten Räume dürfen von Unbefugten nicht betreten werden.

75. Montage- und Reparaturarbeiten an Teilen, welche betriebsmässig Hochspannung haben, sowie die Bedienung der in Hochspannungsstromkreise eingeschalteten Lampen sind nur gestattet, nachdem die betreffenden Teile durch Abtrennen spannungslos gemacht und durch Kurzschluss und Erdung gegen zufällige Unterspannungsetzung geschützt worden sind.

In unabweisbaren Fällen dürfen Montage- und Reparaturarbeiten auch an Teilen ausgeführt werden, die unter Spannung stehen, sofern die den örtlichen Verhältnissen entsprechenden Schutzmassregeln angewendet werden. Die Bestimmung über die Art der zur Verwendung gelangenden Schutzmassregeln ist von dem Betriebsleiter oder dessen besonders Beauftragten persönlich zu treffen; auch ist die Arbeit selbst in Gegenwart des Betriebsleiters oder dessen besonders Beauftragten auszuführen. Sind für solche Arbeiten Gerüste nötig, so finden die Einschränkungen des § 78 keine Anwendung.

Ein einzelner Arbeiter darf niemals derartige Arbeiten vornehmen.

Arbeit an Bahnleitungen, deren Spannung gegen Erde 1000 Volt nicht übersteigt, bedarf für instruiertes Personal keiner besonderen Überwachung.

Die Handhabung von Schaltern, das Auswechseln von Sicherungen sowie in Bahnwagen das Auswechseln von Glühlampen sind nicht als Arbeiten im Sinne dieser Bestimmungen zu betrachten, wenn diese Verrichtungen gefahrlos vorgenommen werden können.

76. Akkumulatorenräume dürfen während der Überladung der Akkumulatoren nicht mit glühenden oder brennenden Gegenständen betreten, noch darf in diesen Räumen offenes Licht entzündet werden.

77. Jeder Arbeitnehmer hat die Pflicht, vor Beginn der eigentlichen Arbeit die benötigten Gerüste, Rüstzeuge, Leitern, Hebezeuge sowie die in

elektrischer Beziehung nötigen Schutzmittel genau auf ihre Sicherheit hin zu untersuchen und nicht Brauchbares zurückzuweisen oder brauchbar herzustellen, oder, wenn dies nicht möglich, dem Vorgesetzten sofort Anzeige davon zu machen.

78. Das Aufbauen von Gerüsten in unmittelbarer Nähe von Maschinen und Wellenleitungen, sowie von blanken Spannung führenden Drähten (bei Hochspannung auch von isolierten Drähten) darf nur vorgenommen werden, wenn sich die Maschinen und Wellenleitungen im Ruhezustand, die Drähte in spannungslosem Zustande befinden. Über die Herbeiführung dieses Zustandes und seine Erhaltung während der Aufstellung des Gerüstes hat sich der Arbeiter mit dem Betriebsleiter oder dessen Beauftragten zu verständigen. Nach der Aufstellung kann der Betrieb der Maschinen und Wellenleitungen und elektrischen Leitungen wieder aufgenommen werden, sofern die Gerüste mit solchen Sicherheitsvorrichtungen versehen sind, dass niemand von laufenden Teilen erfasst, noch durch die zufällige Berührung eines Spannung führenden Drahtes beschädigt werden kann.

Diese Vorschriften gelten nicht für die Aufstellung und Benutzung von Turmwagen und Leitern zur Vornahme von Betriebsarbeiten durch instruiertes Personal.

79. Bei Arbeiten auf Dächern, erhöhten Standpunkten, z. B. Plattformen, wo Schutzgeländer nicht angebracht werden können, muss sich jeder Arbeiter mittels Sicherheitsgurtes und Seiles gegen Herabfallen sichern.

80. Bei Erdarbeiten ist für gute Absteifung des stehenbleibenden Erdreichs und auch für Abgrenzung der Gruben zu sorgen.

81. Für den Transport haben sich die Arbeitnehmer nach den Vorschriften unter VII. zu richten.

Unglücksfälle.

248. Zwei charakteristische Unfälle durch elektrische Schläge.

Hieran anschliessend seien einige charakteristische, tödlich verlaufene Unglücksfälle[1]) erwähnt, aus denen aber erkannt werden kann, wo die Installationstechnik einzusetzen hat, um eine grössere persönliche Sicherheit zu erzielen.

1. Auf dem v. ARNIMschen Steinkohlenwerke zu Planitz bei Zwickau i. S. war eine Drehstromanlage von 500 Volt im Einbau begriffen und zum Teil vollendet. Eine kleine Schachtpumpe war bereits in Betrieb und auf Wunsch der Belegschaft waren an deren Leitung auf der betreffenden Sohle fünf Glühlampen zum Beleuchten des Füllortes und des anschliessenden Teiles des Füllortquerschlages angeschlossen worden. Hierzu dienten zwei an der Firste des Querschlages an Porzellanknöpfen verlegte, mit Kautschuk und Umspinnung isolierte Drähte von $1^1/_2$ mm Durchmesser. Da sich gezeigt hatte, dass man beim Berühren dieser Leitung eine Spur Strom fühlen konnte, so war eine besser isolierte Ersatzleitung bereits bestellt, aber noch nicht geliefert und eingebaut. Das Berühren der Leitung war den Arbeitern

1) Aus Dr. TH. ERHARD, Der elektrische Betrieb im Bergbau. Weitere Abhandlungen siehe ETZ 1895, S. 70, 758; 1896, S. 31; 1897, S. 615, 785; 1899, S. 503, 601, 728, 737; 1900, S. 133; 1901, S. 1028, 1073; 1903, S. 87; 1904, S. 32. ERLACHER, Elektrische Apparate, Hannover 1903, S. 94.

bei strenger Strafe verboten. In der Lichtleitung befand sich eine Bleisicherung für 1 Amp.

Am angeführten Tage förderten drei Mann hintereinander nach dem Füllort. Ein Hund entgleiste und um ihn wieder ins Gleis zu bringen, drückten ihn zwei auf einer Seite nieder, während der Fördermann Möckel an der vorderen Seite zwischen dem Hund und der Streckenmauerung sich mit dem Rücken gegen den Hund stemmte, um ihn ins Gleis zu drängen. Mit den Füssen stemmte er sich gegen die Sohle und mit den Händen gegen den unteren Teil des Firstengewölbes der Streckenmauerung. Als der Hund hierauf nachgab, glitten ihm die Füsse aus und auch die Hände verloren ihren Halt. Er griff nach oben, und da er von grosser Figur war, erreichte er mit der linken Hand einen der Drähte, die etwa 2 m über dem Gleis sich befanden. Er schrie auf, konnte aber nicht wieder los. Einer der anderen Förderleute wollte ihn losreissen, bekam aber selbst einen starken Schlag, gab es daher auf und lief nun schnell nach dem Füllort, um den Strom abstellen zu lassen. Beim Zurückkommen sah er kurz vor dem Erlöschen des Lichtes noch Funken an Möckels Fingern. Dieser wurde jetzt von der Leitung gelöst und kurz darauf hinausgefördert. In der Krankenstube wurden dann, zuletzt unter Leitung des herbeigeholten Arztes, gegen eine Stunde lang Wiederbelebungsversuche gemacht, aber ohne Erfolg. Die Zeit vom Unfall bis zum Beginn dieser Versuche dürfte nach den Angaben der Zeugen etwa eine reichliche Viertelstunde betragen haben. Möckel hatte am zweiten, dritten und vierten Finger der linken Hand quer über die Finger laufende tiefe Brandwunden, die bis auf den Knochen gingen. Der Tod muss sofort eingetreten sein.

Am Drahte befanden sich dicht nebeneinander vier Verletzungen der isolierenden Hülle. An zweien dieser Verletzungen war der blanke Draht zu sehen. Ob diese Verletzungen beim Anfassen des Drahtes durch Möckel erst entstanden sind, vielleicht durch dessen Nägel, ist nicht zu entscheiden, doch dürfte das wohl möglich sein.

Jedenfalls ging aber der Strom durch diese Verletzung in Möckels Körper.

Eigentümlich ist, dass, während der Verunglückte am Drahte hing, keine Schwankung am Lichte der Glühlampe bemerkt wurde, die der Strom speiste. Auch die Bleisicherung schmolz nicht weg. Der Strom, der durch den Körper des Verunglückten ging, kann also nur sehr schwach gewesen sein.

Zufolge des Ereignisses wurde seitens der Werkverwaltung beschlossen, nicht nur die elektrische Beleuchtung bis zum Eintreffen des neuen Drahtes einzustellen, sondern auch nach deren Einbau die Lampenleitung durch Holzplatten gegen zufällige Berührung zu schützen.

2. Ein anderer Fall[1]) zeigt, dass beim Zusammentreffen verschiedener ungünstiger Umstände auch schon bei Gleichstrom von 300 Volt Spannung ein tödlicher Unfall möglich ist. Derselbe geschah in einer elektrischen Lokomotivanlage und ereignete sich folgendermassen:

Die Lokomotive war wegen einer Reparatur ausser Betrieb gesetzt, und die Wagen mussten von den Leuten auf der Strecke gestossen werden. Um nun diese Förderung zu erleichtern, hatte man die in dem betreffenden Querschlage befindlichen Glühlampen, die von der Lokomotivleitung aus gespeist

1) Nach einem Aufsatze von W. Philippi, Heft 34 u. 41 des „Glückauf" 1900.

wurden, brennen gelassen, aus welchem Grunde die Kontaktleitung der Lokomotivanlage unter Spannung bleiben musste. Obwohl die Leitung nur 1·63 m über dem Fussboden lag, also von den Stössern bei der Arbeit leicht berührt werden konnte, sah man hierin nichts Bedenkliches, da bereits häufig genug die blanken Kontaktleitungen berührt worden waren, ohne dass die betreffenden Leute Schaden genommen hätten. Es setzte sich nun einer der Häuer bei diesem Betrieb in einen eisernen Förderwagen und liess sich mit ihm vorwärts stossen. Als der Wagen zum Stillstand gekommen war, erhob sich der Häuer, um auf einen gefüllten, auf einem benachbarten Gleis stehenden Wagen hinüberzuklettern. Hierbei hat er wahrscheinlich mit dem Halse die Kontaktleitung berührt, während er gleichzeitig mit seinen Händen sich fest auf die Wand des eisernen Wagens stützte. Die Folge war ein so heftiger Schlag, dass er zu Boden fiel und nach kurzer Zeit verstarb. Die Ursachen dieses bedauerlichen Unfalls müssen in Folgendem gesucht werden:

Es ist zunächst zu betonen, dass erfahrungsgemäss die Disposition eines vom elektrischen Schlage Betroffenen für die Folgen des Schlages eine besonders wichtige Rolle spielt. Die Einwirkung des elektrischen Schlages auf den Menschen besteht in erster Linie darin, dass die Nerven einen starken Reiz empfangen und wie durch Schreck ihre Thätigkeit einstellen. Besonders gefährlich ist diese Einwirkung natürlich bei denjenigen Nerven, welche die Herz- und Lungenthätigkeit beeinflussen. Hört die Funktion dieser Nerven auf, so ist auch die Thätigkeit des betreffenden Organs, Herz oder Lunge, eingestellt.

Die Reizbarkeit der Nerven, ihre Empfindlichkeit gegen elektrische Schläge, ist bei den einzelnen Menschen sehr verschieden. Alkoholiker sind erfahrungsgemäss gegen elektrische Schläge besonders empfindlich. Möglicherweise spielt auch der Umstand, ob der Mensch kurz vorher in besonderem Masse Alkohol genossen hat, bei den Folgen des elektrischen Schlages eine Rolle.

Bei dem in Rede stehenden Falle lässt der über die Sektion des getöteten Häuers vorliegende Bericht darauf schliessen, dass er mehr oder weniger stark Alkoholiker gewesen ist und daher gegen elektrische Schläge empfindlicher als andere Menschen war.

Was weiter die in Rücksicht zu ziehenden elektrischen Verhältnisse bei diesem Unfall betrifft, so ist, wie in der oben erwähnten Abhandlung auch des näheren ausgeführt wurde, davon auszugehen, dass es hinsichtlich der Folgen eines elektrischen Schlages in erster Linie auf die Stromstärke ankommt, die den menschlichen Körper durchflossen hat. Diese Stromstärke ist bei einer gegebenen Netzspannung E von dem Gesamtwiderstand des in Frage kommenden Stromkreises, in welchen der Mensch geschaltet ist, abhängig und kann ausgedrückt werden durch die Formel

$$J = \frac{E}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4}.$$

Hierbei bedeutet:

E = Netzspannung,
W_1 = Isolationswiderstand des nicht berührten Pols gegen Erde,
W_2 = Übergangswiderstand vom berührten Pol zum Körper,
W_3 = Widerstand des Körpers,
W_4 = Übergangswiderstand vom Körper zur Erde.

Da im vorliegenden Falle die Rückleitung durch die Schienen ging, der nicht berührte Pol der Anlage also an Erde lag, so war W_1 gleich Null. Ein besonders unglücklicher Umstand, der diesen Unfall wohl hauptsächlich zu einem so folgenschweren gemacht hat, war der, dass auch W_2 und W_4 ausserordentlich gering waren und praktisch wohl gleich Null gesetzt werden müssen.

Nach dem vorliegenden Bericht hat der getötete Häuer den verhängnisvollen Schlag erhalten, als er sich in dem Wagen, in dem er sass, aufrichtete, um auszusteigen. Hierbei hat er, was wohl als sicher angenommen werden darf, die blanke Kontaktleitung mit dem blossen Hals berührt und gleichzeitig, um sich zu stützen, mit einer oder mit beiden Händen fest die Wand des eisernen Wagens umfasst. War also schon der Übergangswiderstand am Halse, einem überdies wegen des daselbst liegenden Rückenmarkes schon an und für sich gefährlichen Punkte, sehr gering, so war er an den beiden Händen wahrscheinlich überhaupt gleich Null. Denn der Übergangswiderstand von der Leitung zum Körper und ebenso auch vom Körper zur Erde ist ohne weiteres umgekehrt proportional der Fläche, mit welchem der blosse Körper die Leitung bezw. die Erde berührt, und der Häuer wird den Wagen beim Aussteigen mit einer bezw. den beiden ganzen Handflächen sehr fest umfasst haben. In obiger Formel sind demnach $W_1 + W_2 + W_4 = 0$ zu setzen, oder können doch nur wenig von Null verschieden gewesen sein. Der Strom, der durch den Körper gegangen ist, muss also verhältnismässig sehr gross gewesen sein, da für ihn als Widerstand nur der menschliche Körper und höchstens noch ein geringer Übergangswiderstand von der Leitung zum Körper in Frage kam.

Wenn, wie es der Fall ist, in dieser Anlage bisher eine Berührung des blanken Kontaktdrahtes höchstens empfindliche Schläge, nicht aber Unfälle verursacht hatte, und wenn sogar häufig mit blosser Hand am blanken Fahrdraht gearbeitet wurde, so ist die Erklärung hierfür darin zu suchen, dass die betreffenden Leute sowohl weniger empfindlich gegen einen elektrischen Schlag waren, als auch die Werte W_2 bezw. W_4 wesentlich über Null gelegen haben. Der Übergangswiderstand vom Körper zur Erde wird, da die Leute wahrscheinlich Schuhzeug angehabt haben, stets einige 1000 Ohm betragen haben.

Als weiterer unglücklicher Umstand ist noch hervorzuheben, dass die Leute, die bei dem Unfall zugegen gewesen waren, keine systematischen Wiederbelebungsversuche angestellt haben. Da die Spannung nach den bisherigen Erfahrungen als ungefährlich angesehen wurde, werden die Leute mit den Vorschriften für die Wiederbelebung solcher, die vom elektrischen Schlage getroffen sind, nicht bekannt gewesen sein.

Die Feuersicherheit elektrischer Anlagen und Massregeln zur Erhaltung derselben.

249. Welche Räume sind als feuergefährlich aufzufassen?

Die Installation einer elektrischen Anlage muss stets so ausgeführt werden, dass sie zu Bränden keine Veranlassung geben kann. In welcher Weise dies geschehen muss, ist im Vorstehenden erörtert, ebenso, dass in feuer- und explosionsgefährlichen Räumen besondere Rücksicht auf die örtlichen Verhältnisse genommen werden muss.

Welche Räume sind nun als feuergefährlich, welche als explosionsgefährlich aufzufassen?

Wohl geben die Sicherheitsvorschriften Definitionen für diese Räume, die indessen Missdeutungen nicht ausschliessen.[1] Als feuergefährlich bezeichnet Dr. C. L. WEBER[2] Schreinerwerkstätten, Sägewerke, Baumwollspinnereien. Nach den Vorschriften (§ 3 g) sind dies also Räume, in denen leicht entzündliche Gegenstände erzeugt oder angehäuft werden. Die näheren Bedingungen für die Installation in derartigen Räumen giebt dann § 39 (feuergefährliche Betriebsstätten) und § 44 (Schaufenster, Warenhäuser und ähnliche Räume, in welchen leicht entzündliche Stoffe aufgestapelt sind) der Sicherheitsvorschriften.

Es ist nun zu beachten, dass der Verband nicht ganze Betriebe als feuergefährlich bezeichnet, sondern bei jedem einzelnen Raum untersucht wissen will, ob derselbe als ein feuergefährlicher zu gelten hat oder nicht.

Als Kriterium der Feuergefährlichkeit eines Raumes bezeichnet die Definition § 39, dass darin „leicht entzündliche Gegenstände erzeugt oder angehäuft werden“. Es sind also die Teile dieses Kriterium getrennt zu prüfen:

1. Unter der „Erzeugung“ von leicht entzündlichen Gegenständen ist jede Zustandsänderung zu verstehen, welche an den betreffenden Gegenständen vorgenommen wird, also auch z. B. die Verpackung.

2. Unter der „Anhäufung“ versteht man die Vereinigung einer für die vorliegenden Verhältnisse wesentlichen Menge der betreffenden Gegenstände. (Eine Schachtel Zündhölzer ist also noch keine Anhäufung.) Das Vorhandensein unwesentlicher Mengen leicht entzündlicher Gegenstände in einem Raume bietet also noch keine Veranlassung zur Anwendung verschärfter Installationsvorschriften.

Sind Vorkehrungen getroffen, welche verhüten, dass sich leicht entzündliches Material in wesentlichen Mengen im betreffenden Raume ansammeln kann, so wird eine häufige Reinigung die Feuergefährlichkeit des Raumes wesentlich herabsetzen. So wird z. B. in modernen Holzbearbeitungsfabriken der Holzstaub und die Späne unmittelbar an den Maschinen unter Benutzung kräftiger Ventilatoren abgesaugt, so dass sich leicht entzündliches Material überhaupt nicht ansammeln kann und der Begriff der Feuergefährlichkeit für derartige Räume nicht zutrifft.

Handelt es sich um staub- oder gasförmiges Brennmaterial, so spielt speziell die Häufigkeit und Gründlichkeit der Lüftung eine bedeutende Rolle. Man wird eine auf einer Seite völlig offene Halle nicht als ebenso feuergefährlich betrachten, falls darin Staubkohle, Getreide oder Benzin in Ballons lagert oder verarbeitet wird, wie einen geschlossenen Raum. Eine kräftige künstliche Ventilation, die betriebssicher und dauernd arbeitet, hat ähnlichen Einfluss.

3. Die Eigenschaft, „leicht entzündlich“ zu sein, ist bei einem Gegenstand von verschiedenen Umständen abhängig, und zwar:

a) Von dem Material des Gegenstandes: Der Gebrauch der Praxis unterscheidet zwischen „brennbarem“ und „nicht brennbarem“ Material.

1) Vgl. ETZ 1903, S. 142.

2) Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften, 7. Aufl., S. 29.

Streng genommen ist aber fast jedes Material brennbar, d. h. oxydierbar. Wir können nun innerhalb des Bereichs der brennbaren Materialien die grössere oder geringere Leichtentzündlichkeit nach der „Entflammungstemperatur“ (Entzündungstemperatur) des betreffenden Materials abstufen.

Unter Entzündungstemperatur versteht man diejenige, unter welcher das betreffende Material in atmosphärischer Luft von normalem Druck und Feuchtigkeitsgehalt sich entzünden lässt.

Liegt diese Temperatur unter 1000° C., so bezeichnet man in der Praxis das Material als brennbar.

Die Entzündungstemperatur einiger Brennstoffe beträgt (nach BUNGERN) für:

Torf	225° C.
Steinkohle	326° C.
Holzkohle	360° C.
Koks	700° C.
Leuchtgas	800° C.
Luftgas	900° C.

b) Diese Entzündungstemperatur ist nicht zu verwechseln mit der „Brenntemperatur“, d. h. die Temperatur, welche die Flamme aus dem betreffenden Material liefert.

Da die Brenntemperatur die nötige Wärme zur Vorwärmung des nächstliegenden Teilchens Brennstoff bis auf die Entzündungstemperatur liefern muss, wenn die Entzündung sich von selbst fortpflanzen, wenn also das Material von selbst weiterbrennen soll, so muss sie höher liegen als die Entzündungstemperatur.

Der kalorische Heizeffekt sowie das Wärmeleitungsvermögen und die spezielle Wärme des Materials ist dabei gleichfalls von Einfluss.

c) Ein und dasselbe Material (z. B. Fichtenholz) wird eine verschiedene Entzündungstemperatur haben, je nach seinem Feuchtigkeitsgehalt. So wird z. B. auch die Baumwolle in verschiedenen Stadien ihrer Verarbeitung verschieden feucht gehalten und dieser Feuchtigkeitsgrad wird in manchen Arbeitssälen so hoch gesteigert, dass die Entzündlichkeit des Materials bedeutend herabgesetzt, in gewissen Stadien der Fabrikation überhaupt ausgeschlossen wird. — Auch in Holzschleifereien wird das Holz unter Wasser geschliffen, kann also hier nicht als leicht entzündlich gelten.

d) In innigem Zusammenhange hiermit steht der Feuchtigkeitsgehalt der umgebenden Aussenluft, welche in manchen Fabrikationsbetrieben künstlich dauernd auf einer maximalen Höhe erhalten wird, wodurch die Entzündung von Materialien in dem betreffenden Raume direkt — weil der Wasserdampf als unwirksamer „inerter“ Bestandteil der Luft bei der Oxydation mit erwärmt werden muss — und —, wenn die betreffenden Materialien hygroskopisch sind, — auch indirekt erschwert wird. Dies ist z. B., wie oben erwähnt, in Baumwollspinnereien häufig der Fall.

e) Von wesentlichem Einfluss auf die Entzündlichkeit ist auch das Gefüge des Materials. Denn es ist massgebend für die selbstthätige innere Fortpflanzungsfähigkeit einer geringeren, völlig begrenzten Entzündung

durch eine äussere Entzündungsquelle. In massiven Stücken, welche eine im Vergleich zu der entzündenden Wärmequelle hohe Abkühlungsfläche besitzen und andererseits dem Sauerstoff der Luft nur an den Aussenflächen Zutritt bieten, erfolgt eine Fortpflanzung der Entzündung unter ungünstigeren Bedingungen als in kleinstückigem, lockerem, staubförmigem oder gar gasförmigem Material. Z. B. sind Eichenklötze viel weniger entzündlich als Sägespäne, Stückkohle weniger als Kohlenstaub, Körner weniger als Mehl.

f) Die Art der Verpackung und Packung spielt in Lagerräumen gleichfalls eine bedeutende Rolle. Werden z. B. Phosphorvorräte unter Wasser gelagert, so sind sie nicht mehr leicht entzündlich, oder wenn Hopfen ausschliesslich in der üblichen Überseeverpackung — grosse Trommeln aus 3—4 mm dickem Eisenblech mit Eisenrippen und luft- und wasserdichten Eisenverschlüssen — lagert, kann er für den vorliegenden Zweck nicht als leicht entzündlich gelten, wenn auch sonst gedarrter, geschwefelter Hopfen sehr leicht entzündlich ist.

Auch diejenigen Verpackungsarten, bei denen das Material sehr fest zusammengepresst wird, vermindern je nach der Innigkeit der dadurch erzeugten Vereinigung der kleinen Teile die Entzündlichkeit. So sind Torfmullballen, die unter hydraulischem Druck oder unter der Dampfpresse zusammengepackt werden, schwer entzündlich. Gut gepresste Hopfensäcke sind nicht so hoch entzündlich als lose lagernde Haufen. Zeitungspapier auf den üblichen grossen Rollen, von der Maschine aufgerollt, ist fast nicht zu entzünden, weil es ein massives Ganzes bildet, ebenso dicht gestapelte Papierballen oder Wollballen. Es ist bekanntlich fast unmöglich, alte Akten durch Feuer zu vernichten.

Weiter von Einfluss auf die Entzündlichkeit ist die Temperatur, welche die betreffenden Materialien besitzen. Es ist möglich, dass entweder die Aussentemperatur im betreffenden Raume infolge der Betriebsverhältnisse eine abnormal hohe ist oder dass das Material selbst eine höhere Eigentemperatur als die Aussenluft besitzt, sei es, dass es direkt vorgewärmt wurde oder sich durch die Art der Bearbeitung stark erhitzt hat. In allen diesen Fällen ist die Entzündlichkeit eine erhöhte.

Von einigem Einfluss ist auch der spezifische Bedarf an Verbrennungsluft,[1]) der dem betreffenden Material eigentümlich ist.

Wichtig ist jedoch die Dauer der Entzündung, d. h. die Menge der zugeführten Wärme, denn es muss ein gewisses Quantum des Materials auf die Entzündungstemperatur gebracht werden, damit die Entzündung fortpflanzungsfähig ist. Dieses Quantum ist um so kleiner, je kleinstückiger das Material ist. Staubförmiges Material kann durch ganz kurzdauernde Erwärmung entzündet werden. Grobes Material kann durch eine sehr hohe, aber kurzdauernde Erhitzung nicht entzündet werden (kalte Blitzschläge).

Aus Vorstehendem ist ersichtlich, dass die Entzündlichkeit eines Materials keineswegs eine Konstante desselben ist, sie ist vielmehr eine Funktion einer ganzen Reihe von Umständen. Die Verbandsvorschriften sprechen deshalb auch nicht von entzündlichem Material, sondern von entzündlichen Gegenständen.

1) Vgl. HÜTTE, Teil I, S. 338, 18. Aufl.

Überhaupt kommt für die Entzündlichkeit eines Gegenstandes seine Form sehr in Betracht. Ist er scharfkantig, so ist die Entzündung viel eher möglich als bei abgerundeten Formen.

Im Sprachgebrauch des täglichen Lebens unterscheidet man wohl folgende Hauptstufen der Entzündlichkeit:

1. Der Gegenstand entzündet sich bei Berührung mit atmosphärischer Luft von selbst (Selbstentzündung), z. B. Phosphor (faulendes Heu und Baumwolle gehören nicht streng hierher, weil sie sich vorher eine hohe Entzündungstemperatur durch chemische Vorgänge erzeugen).

2. Die Gegenstände sind durch ein glimmendes Zündhölzchen, durch eine glimmende Cigarre zu entzünden, z. B. lockere Baumwolle, Watte, Heu, Sägespäne, Schiesspulver.

3. Die Gegenstände können durch ein brennendes Zündholz entzündet werden, z. B. Leuchtgas, Petroleum, Rüböl, Holzspäne, Teer, Baumwollstoffe u. s. w. (Cigarren bedürfen noch der künstlichen Zugerzeugung).

4. Die Gegenstände können durch eine Kerze oder andere Dauerflammen entzündet werden (dickere Holzstücke, Wollstoffe).

5. Die Gegenstände können durch eine Bunsenflamme oder Knallgasflamme entzündet werden (z. B. Blei).

6. Die Gegenstände sind nur in reiner Sauerstoffatmosphäre zu entzünden (z. B. Eisenspäne).

Im täglichen Leben wird man wohl für gewöhnlich nur die Gegenstände unter 1 bis 3 als leicht entzündliche auffassen.

Die Abstufung der Entzündlichkeit kann also nach der Entzündungsquelle erfolgen.

Wo nun die Reihe der leicht entzündlichen Gegenstände im Sinne der Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker beginnt, ist aus dem Sinne der §§ 39 und 44 selbst zu entnehmen.

Die §§ 39 bis 44 fassen nämlich als Quelle der Entzündung folgende Möglichkeiten ins Auge:

1. Elektrische Funken an Dynamomaschinen, Motoren u. s. w., § 39a;
2. Elektrische Lichtbogen in Schaltern, Sicherungen, § 39b, § 44c;
3. Aus Bogenlampen herausfallende glühende Kohleteilchen, § 39c, § 44e, f;
4. Glimmendes und brennendes Isoliermaterial, § 39a und d, § 44a, b, d.

Freihängende Glühlampen als Entzündungsquelle finden in diesen beiden §§ noch keine Erwähnung.

Schätzen wir die Temperatur und Dauer dieser vier Entzündungsquellen, so finden wir etwa:

1. Elektrische Funken an Dynamomaschinen, Motoren u. s. w., Temperatur 3000—4000° C., bei normalem Betrieb Dauer $> {}^1/_{100}$ Sek.;
2. Elektrische Lichtbogen in Sicherungen, Schaltern bei normalem Betrieb 3000—4000° C., Dauer ${}^1/_{10}$ Sek.;[1])
3. Glühende abgefallene Kohleteilchen 500—700° C., Dauer 1—10 Sek.;
4. Brennendes Isoliermaterial 500—900° C., Dauer 1—3 Min.

---

1) Vgl. ETZ 1904, S. 762; Oelschläger, Über den zeitlichen Verlauf des Schmelzstromes von Sicherungen.

Es ist ersichtlich, dass den hohen Temperaturen der ersten Quelle als gefahrmindernd deren kurze Dauer (selbstverständlich nur bei normalem Betrieb) gegenübersteht, so dass brennendes Isoliermaterial die gefährlichste Entzündungsquelle bilden dürfte.

Aus diesen Erwägungen ist aber Folgendes zu entnehmen:

Unter leicht entzündlichen Gegenständen im Sinne der §§ 39 und 44 der Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker sind solche zu verstehen, welche schon durch kleine elektrische Lichtbogen, kurzdauernde kleine elektrische Funkenentladung, durch herausfallende Teilchen von Bogenlampenkohlen oder durch brennende und glimmende Teile der Drahtisolierung eine fortpflanzungsfähige Entzündung unter den im jeweilig vorliegenden Falle herrschenden Verhältnissen erfahren können.

Leicht entzündliche Gegenstände sind nun zwar fast in jedem Raum vorhanden, z. B. Gardinen, Streichhölzer u. s. w.

Die §§ 39 und 44 beschränken deshalb mit Recht ihr Geltungsbereich auf solche Räume, wo derartige leicht entzündliche Gegenstände verarbeitet oder angehäuft werden (§ 3g der Vorschriften).

250. Welche Räume sind als explosionsgefährlich aufzufassen?

Als explosionsgefährlich gelten Räume, in denen explosible Stoffe aufgespeichert werden oder in denen sich betriebsmässig explosible Gemische von Gasen, Staub oder Fasern bilden oder anhäufen können (§ 3h).

Anm. 11 der Erläuterungen von Dr. C. L. Weber hierzu lautet: Hierher gehören gewisse Teile von Getreidemühlen, Lagerräume für Spirituosen u. s. w. Die Explosionsfähigkeit von Mehl, Staub und ähnlichen Stoffen ist neuerdings wieder durch Versuche festgestellt worden. Ein Raum, der mit einer Gasleitung ausgestattet ist, wird dadurch noch nicht zu einem explosionsgefährlichen; wenn hier auch die Bildung explosibler Gemische durch Austritt des Gases nicht völlig ausgeschlossen ist, so kann sie doch nur durch grobe Fahrlässigkeit oder unsachgemässe Beschaffenheit der Gasleitung eintreten, wird also niemals „betriebsmässig“ vorkommen. Es sei indessen darauf hingewiesen, dass namentlich die Räume, in denen Gasuhren aufgestellt sind, eine besondere Beachtung verdienen. Wenn sie auch im Sinne dieser Vorschriften nicht als explosible Räume gelten, so ist doch einige Vorsicht in ihrer Behandlung und bei ihrer Ausrüstung mit elektrischen Einrichtungen geboten.

§ 40 behandelt dementsprechend „explosionsgefährliche Betriebsstätten und Lagerräume“.

Anm. 1 lautet: Was als explosionsgefährlicher Raum zu betrachten ist, muss von Fall zu Fall je nach Art des Betriebs und der vorkommenden Stoffe entschieden werden. Es gehören hierher Sprengstofffabriken, gewisse Teile von Gasfabriken, Benzinwäschereien, unter Umständen auch Getreidemühlen, Baumwollspinnereien und dergl.

Auch hier werden nicht ganze Betriebe, sondern einzelne Räume betrachtet und jeweilig als explosionsgefährlich bezeichnet.

Die Definition spricht also erstens von „explosiblen Stoffen“ und zweitens von „explosiblen Gemischen von Gas, Staub oder Fasern“.

Unter explosiblen Stoffen sind diejenigen stofflichen Verbindungen oder Gemenge verstanden, welche das Sprengstoffgesetz vom 9. Juni 1884 als „explosive Stoffe“ bezeichnet (die Ausnahmen, die dieses Gesetz gestattet, sind also hier nicht vorgesehen).

Es ist innerhalb der explosiblen Stoffe zu anderen Zwecken wohl üblich, nach der Höhe ihrer Entzündungstemperaturen zwischen „impulsiven“ und „brisanten“ einerseits und „fulminanten Sprengstoffen“ andererseits zu unterscheiden.

Für den vorliegenden Zweck ist diese Unterscheidung jedoch ohne Belang, weil die Entzündungstemperatur auch der impulsiven Sprengstoffe niedriger liegt als die Temperatur der elektrischen Funken und Flammen, also eine Entzündung fast jeden Sprengstoffs durch elektrische Ströme und Funken möglich ist. Explosible Stoffe sind im allgemeinen sehr leicht entzündlich und deshalb fasst § 40 auch den Schutz gegen eine Entzündung nur durch die Wärme des Glasballons der Glühlampe (etwa 90° C.) ins Auge. Die Explosibilität bildet die obere Grenze der Leichtentzündlichkeit. Die Definition spricht deshalb ganz allgemein von „explosiblen Stoffen“ und Räume, in denen derartige Stoffe aufgespeichert werden, gelten nach der Definition ohne weiteres als explosionsgefährlich, ohne dass in eine nähere Untersuchung darüber eingetreten wird, ob eine Entzündungsmöglichkeit im Einzelfalle vorliegt oder nicht.

Es ist jedoch der Ausdruck „aufgespeichert“ gewählt, welcher immerhin eine wesentliche Menge voraussetzt und auch annimmt, dass der Raum bestimmungsgemäss der Aufbewahrung solcher Stoffe dient. Bei welcher Menge die „Aufspeicherung“ beginnt, hängt in geringem Masse von den Raumverhältnissen, hauptsächlich aber von der Brisanz des betreffenden Sprengstoffes ab. Es muss auch hier die betreffende Menge imstande sein, eine im betreffenden Raum wesentliche Explosion zu ermöglichen. Man wird einen Raum noch nicht als explosionsgefährlich bezeichnen können, weil darin ein Dutzend Jagdpatronen aufbewahrt sind. Dagegen wird man die Räume, welche auch nur geringe Mengen Dynamit zu Sprengzwecken bergen, stets zu den explosionsgefährlichen rechnen. Hat ein Drogist einige „Schwärmer“ lagern, so ist sein Lager deshalb noch nicht explosionsgefährlich, wohl aber ein wohlgefüllter Lagerraum mit Feuerwerkskörpern.

Explosible Gemische von Gas, Staub oder Fasern. Dies sind solche Gemische von Gasen, Staub oder Fasern mit anderen Gasen (z. B. Luft) oder Fasern, bei denen die Entzündung durch eine Flamme, durch elektrische Funken oder eine Erschütterung eine Explosion auslösen kann. Ist jedoch zur Erzielung der Explosion erst eine weitere chemische oder physikalische Behandlung erforderlich, so ist vor derselben die betreffende Mischung nicht explosibel, z. B. hochsiedende Öle in Mischung mit Luft werden erst bei starker Erhitzung explosibel. In erster Linie handelt es sich dabei um rapide Verbrennungen, d. h. um Mischungen brennbarer Gase (oder Dämpfe) mit Sauerstoff bezw. Luft oder Mischungen fein verteilten organischen Staubes (Mehl, Kohlen) mit Luft, welche unter den vorliegenden Verhältnissen entzündet, diese Entzündung rapid unter starker Gasentwickelung fortpflanzen, also explodieren.

Weiter verlangt die Definition, dass in dem betreffenden Raum explosible Gemische sich bilden oder anhäufen können.

Eine offene Halle, in der Benzin lagert, wird deshalb nicht als explosionsgefährlicher Raum gelten, denn infolge der lebhaften Ventilation können sich explosible Gemische darin nicht bilden.

Ebensowenig ist ein Gang, durch den regelmässig Behälter mit gefüllten Patronen oder sonstige Geschosse transportiert werden, ein explosions-

gefährlicher Raum, denn die explosiblen Gemische werden dortselbst weder aufgespeichert, noch können sie sich anhäufen.

Die Definition verlangt jedoch weiter, wenn ein Raum als explosionsgefährlich gelten soll, dass sich derartige explosible Gemische „betriebsmässig“ bilden oder „anhäufen“ können. Infolge grober fahrlässiger Handlungen kann sich nämlich ein derartiges explosibles Gasgemisch z. B. in jedem Zimmer bilden, in dem Leuchtgasleitungen liegen. Trotzdem ist ein solcher Wohnraum dieserhalb noch kein explosionsgefährlicher Raum.

Nur wenn bei der gewöhnlichen Betriebsführung die Möglichkeit vorliegt, dass sich explosible Gemische bilden oder anhäufen, kann der betreffende Raum als explosionsgefährlich schlechtweg gelten.

Es sind also wesentliche Merkmale der Explosionsgefährlichkeit von Räumen die Vorbedingungen, von denen die Bildung oder Anhäufung des explosiblen Gemisches abhängt. Ist nur ein rein zufälliges Zusammentreffen gewisser Vorbedingungen erforderlich, so handelt es sich um einen explosionsgefährlichen Raum im Sinne des § 40.

Sind jedoch besondere Vorbedingungen erforderlich, die aber im Bereiche fahrlässiger Handlungen liegen, so handelt es sich um einen „bedingt explosionsgefährlichen Raum“.

Die bedingt explosionsgefährlichen Räume finden sich fast nur in chemischen Betriebsstätten und sind neuerdings in § 47 der Verbandsvorschriften einer besonderen Behandlung unterzogen worden.

Sind dagegen grobe fahrlässige Handlungen, absichtliche Sachbeschädigungen oder elementare Ereignisse (Erdbeben, Hauseinsturz, Wirbelstürme u. s. w.) erforderlich, um die Bildung oder Anhäufung explosibler Gemische zu ermöglichen, so ist der Raum nicht mehr als explosionsgefährlich zu betrachten.

Hierzu seien noch einige Beispiele angeführt.

Eine Mahlmühle,[1]) welche mit offenen Maschinen arbeitet, wird bei ungünstigen örtlichen Verhältnissen explosionsgefährliche Räume enthalten, da sich der Mehlstaub entzünden kann. Ist die Mühle dagegen mit modernen, von oben bis unten geschlossenen Gängen ausgestattet, so ist eine Mehlstaubansammlung in der Luft überhaupt nicht möglich und es ist keine Explosionsgefährlichkeit, wahrscheinlich auch keine Feuergefährlichkeit vorhanden.

Wird in einem Raum offen Benzin oder Petroleum abgefüllt, so kann sich ein explosibles Gemisch ansammeln, wenn nicht für eine geeignete Abführung der Gase gesorgt ist. Legt man dagegen die Petroleum- oder Benzintanks unter die Erdoberfläche und entlüftet sie durch geeignete Ventilationsanlagen, so kann, selbst wenn in darüber gelegenen Räumen die Flüssigkeit stets abgefüllt wird, von einer Explosionsgefährlichkeit nicht die Rede sein, wenn die Abfüllvorrichtungen so gebaut sind, dass ein Verschütten der Flüssigkeit in grösseren Mengen ausgeschlossen ist. Dies ist aber bei den modernen Abfüllstationen stets der Fall.

Dass im übrigen die Abführung gasiger Gemische und Zuführung frischer Luft die Explosionsgefährlichkeit eines Raumes aufhebt, beweist der Umstand, dass in Schlagwettergruben die Aufstellung von elektrischen Apparaten u. s. w. gestattet ist, wenn sie im einziehenden Wetterstrom liegen.

---

1) Vgl. auch ETZ 1905, S. 129.

Werden in chemischen Fabriken irgend welche Destillate, welche im geeigneten Mischungsverhältnis mit Luft explosibel sind, in absolut geschlossenen eisernen Behältern verarbeitet, so können derartige Räume noch nicht ohne weiteres als explosionsgefährlich gelten. Findet die Destillation jedoch in gläsernen, leicht zerbrechlichen Retorten oder in solchen Apparaten statt, bei denen ein Austreten des Destillates möglich ist, wenn es aus irgend welchen Ursachen einen wenn auch geringen Überdruck annimmt, so müssen die verschärften Vorschriften in Anwendung kommen.

251. Warenhäuser, Schaufenster.

Durch ihre Art bedingen nun auch noch andere Räume eine gewisse Aufmerksamkeit, und zwar hauptsächlich diejenigen, in denen sich grössere Menschenmassen ansammeln und in denen ausserdem leicht entzündliche Stoffe aufgestapelt sind. Hierher gehören hauptsächlich Warenhäuser und ähnliche Räume, sowie deren Schaufenster. Speziell ist hier die Behandlung der beweglichen Leitungen beachtenswert, da diese starker Abnutzung unterliegen und bei Dekorationen in unmittelbare Nähe von Stoffen gelangen. Für diese kommen zwei Installationsmöglichkeiten in Betracht. Es wird entweder metallumhüllte Mehrfachleitung verwendet, welche sowohl mit dem Metallmantel der Fassung als auch mit einer geerdeten Hilfsleitung verbunden sein muss, oder es sind biegsame Gummiaderschnüre zu verwenden, welche zum mechanischen Schutze einen widerstandsfähigen Überzug aus Segeltuch, Leder oder Hanfschnurumklöppelung erhalten müssen.

Für Warenhäuser kommen ausser den Verbandsvorschriften (§ 44) noch Sondervorschriften der Polizeibehörden in Betracht. Am wichtigsten und am meisten verbreitet sind die beiden folgenden, die insoweit wiedergegeben werden, als sie für elektrische Anlagen in Frage kommen.

Allgemeine Anweisung für die Feuer- und Betriebssicherheit in grossen Geschäftshäusern und Warenhäusern, herausgegeben vom Bayerischen Staatsministerium des Innern am 7. Oktober 1903:

„4. Elektrische Beleuchtungsanlagen müssen den vom Verbande Deutscher Elektrotechniker aufgestellten Sicherheitsvorschriften entsprechen und in angemessenen Fristen spezieller fachmännischer Prüfung unterstellt werden.

Alle elektrischen Leitungen, welche äusserlichen Beschädigungen ausgesetzt sind, müssen hiergegen in völlig ausreichender Weise geschützt werden.

Elektrische Beleuchtungsanlagen sind thunlichst über den Verkehrswegen anzuordnen. Sie dürfen sich nicht in unmittelbarer Nähe leichtbrennbarer Stoffe befinden oder von solchen Stoffen umhüllt werden.

Glühlampen, die sich in der Nähe brennbarer Stoffe befinden oder von brennbaren Stoffen berührt werden können, sind durch eine zweite Glocke oder in ähnlich sicherer Weise (Gitter u. s. w.) zu schützen.

Bogenlampen müssen Vorrichtungen erhalten, die das Herabfallen glühender Kohleteilchen sicher verhüten.

5. Die Beleuchtung der Auslagen und Schaufenster darf nur von aussen oder in der Art erfolgen, dass sich zwischen dem Schaufenster und dem Beleuchtungskörper nebst Leitungen starke, genau abschliessende Glasscheiben befinden.

Glühlampen mit besonderen Schutzglocken (Gittern und in Röhren), sicher verlegten elektrischen Leitungen innerhalb der Schaufenster sind nur dann zulässig, wenn die letzteren feuersicher gegen den Innenraum abgeschlossen sind.

6. Notbeleuchtung ist bei allen zum Ausgange dienenden Thüren und Ausgängen einzurichten und bei eintretender Dunkelheit in Betrieb zu setzen.

Zur Notbeleuchtung sind Kerzen in Laternen, Rüböllampen oder solche elektrische Lampen, welche durch eine besondere Betriebsquelle gespeist werden, zu verwenden. Auf die Notbeleuchtung finden die vorstehenden Sicherheitsvorschriften sinngemässe Anwendung."

Bezüglich der Schaufenster sei an die Verfügung des Polizeipräsidenten von Berlin erinnert. Hdb. VI_2 S. 306.

252. Theateranlagen.

„Sonderbestimmungen für Theater sind," wie Dr. Weber in seinen Erläuterungen sagt, „aus zwei Gründen notwendig, zunächst, weil es sich um grosse Menschenmengen handelt, für die nicht nur die unmittelbare Brandgefahr, sondern auch die aus einer Panik entstehenden Folgen zu fürchten sind. Zum anderen, weil in Theatern, besonders im Bühnenraum, verhältnismässig grosse Lichtmengen, auf engem Raum zusammengedrängt, gebraucht werden und dieser Gebrauch behufs Erzielung der Bühnenwirkungen ein eigenartiger ist, der die elektrische Einrichtung in besonders hohem Masse beansprucht. Namentlich sind mechanische Beschädigungen durch die Bewegung der Beleuchtungskörper selbst, sowie durch die Bewegung der Bühnenrequisiten und der Personen zu befürchten.

Ebenso wie Theater sind in der Regel auch Zirkusgebäude, Konzertsäle, Ballsäle, Häuser für Variétévorstellungen und ähnliche Zwecke zu behandeln. Eine Abgrenzung ist nur unter Würdigung der Betriebsart von Fall zu Fall möglich."

253. Massnahmen zur Herbeiführung grösserer Feuersicherheit in der Installation.

Im einzelnen wären nun noch diejenigen Massnahmen zu besprechen, welche eine Feuersgefahr durch die elektrische Anlage ausschliessen sollen.

Elektrischen Maschinen wohnt, trotz ihrer geringen räumlichen Ausdehnungen, ganz gewaltige Energie inne, die, durch irgend welche Fehler in falsche Bahnen geleitet, sich in Wärme umsetzt und zündend wirkt. Aber nicht nur in aussergewöhnlichen Fällen können elektrische Maschinen und Apparate eine Gefahr für eine leichtentzündliche Umgebung bilden, da ja an vielen Apparaten normalerweise Funken auftreten. Es ist daher stets dafür Sorge zu tragen, dass diese Feuererscheinungen brennbare Stoffe nicht erreichen können. Dass daher in feuer- oder explosionsgefährlichen Räumen derartige Maschinen und Apparate nicht ohne weiteres, sondern eingekapselt oder mit Schutzkästen umgeben, aufgestellt werden dürfen, ist selbstverständlich, ebenso muss für genügende Reinhaltung der Maschinen und Apparate im Betrieb Sorge getragen werden. — Die Einkapselung der Motoren hat indessen auch seine Schattenseiten, da grössere Typen Verwendung finden müssen, und Schutzkästen haben sich als Staubfänger herausgestellt und das Übel vergrössert. Es müssen also auch hier die örtlichen Verhältnisse recht sehr in Betracht gezogen werden.

Aber auch an anderen Stellen muss für eine genügende Sicherheit durch die Montage auf feuersicherer Unterlage, durch Zwischenlegen hitzebeständiger Materialien und genügende Abstände gesorgt werden. So sind die Widerstände der Bogenlampen, Drosselspulen, Transformatoren stets in einigem Abstand von der Wand zu montieren. Schalter müssen so angeordnet sein, dass die Drähte nie an die Wand gepresst werden.

In Akkumulatorenräumen liegt die Möglichkeit einer Entzündung des bei der Ladung entstehenden Knallgases vor. Zu diesem Zeitpunkt dürfen also brennende oder glühende Körper im Akkumulatorenraum nicht geduldet werden, so dass also auch Reparaturarbeiten (Löten) ausgeschlossen sind. Wie gering indessen die Gefahr einer Entzündung ist, beweist der Umstand,

dass kaum mehr als eine Entzündung der Gase im Akkumulatorenraum stattgefunden hat. Die Menge des Gasgemisches ist auch ausserordentlich gering, so dass schon eine schwache Ventilation (eventuell durch Öffnen einiger Fenster herbeigeführt) genügt, um sie abzuführen. Nur bei der ersten oder späteren Überladungen ist Vorsicht geboten, da dann die Gasentwickelung reichlicher vor sich geht.

Um jedoch gegen alle Eventualitäten gesichert zu sein, werden die Glühlampen mit Schutzgläsern versehen, welche alle Metallteile umfassen. Im übrigen ist die Möglichkeit der Entzündung des Knallgases durch den Kohlefaden einer Glühlampe von 16 Normalkerzen kaum anzunehmen, vermag er doch die viel leichter entzündlichen Schlagwetter kaum zu entflammen, wie die Versuche[1]) von Heise und Thiem gezeigt haben.

Die weitaus häufigste Ursache von Bränden geben die Leitungen, da sie naturgemäss mechanischen Verletzungen viel eher ausgesetzt sind und in ihrer Verteilung bis in die kleinsten Zweige und Winkel sich dem Auge entziehen. Es muss aber betont werden, dass der Kurzschluss zwischen zwei Leitungen verschiedenen Potentials Sicherheit bedeutet, weil dann die Sicherungen abschmelzen. Der Kurzschlussfunke kann nur dann zünden, wenn er brennbare Stoffe vorfindet, und diese sollen den Leitungen ferngehalten werden. Gefährlicher sind Erdschlüsse und Fehler an solchen Stellen des Leitungsnetzes, welche nicht die Stromquelle, wohl aber Schalterleitungen kurzschliessen.

254. Fehler in Schnurinstallationen.

Wir kommen hierdurch zur Betrachtung eines unsicheren Zustandes, der in Hausinstallationen auftreten kann, wenn nicht die genügenden Vorsichtsmassregeln getroffen und ein einwandsfreies Leitungsmaterial verwendet wird. Ausschliesslich wird hiervon die auf Seite 250 u. ff. dieses Bandes beschriebene Installation mit Schnurleitungen betroffen.

Als noch die meisten Installationen mit 110 Volt betrieben wurden, wurden die damals durchweg üblichen Gummibandschnüre (vgl. Hdb. VI_1 S. 169) als durchaus betriebssicher verwendet. In den Installationen aber, in denen die Lampenspannung auf 220 Volt erhöht wurde, zeigten sich bald Durchschläge, die sich aber in den weitaus meisten Fällen in den Schalter- und Umschalteleitungen bemerkbar machten.

Die Ursache war darin zu suchen, dass das zur Isolierung verwendete Gummiband aus kommerziellen Gründen nicht mehr aus reinem Gummi hergestellt wurde, sondern aus einem Material, welches bisweilen 50 bis 70 % Beimischungen enthielt, wodurch es zwar schwerer und weniger elastisch wurde, aber keineswegs Anspruch auf die Bezeichnung Gummi mehr erheben durfte. Bei schlechten Fabrikaten wurde auch noch insofern gespart, als das spiralförmig um den Kupferleiter gewickelte Gummiband sich wenig überlappte. Nach einiger Zeit zog sich dann auch das bei der Fabrikation stark gereckte Band zusammen, so dass es nunmehr eine offene Spirale bildete. Immerhin genügte dieses Material bei einer Spannung von 110 Volt, nicht aber bei 220 Volt.[2])

---

1) ETZ 1898, S. 3, 34, 46.

2) Eine ausführliche Darstellung der Vorgänge beim Durchschlagen von Schnurleitungen, die auch durch einige interessante Abbildungen eingehend erläutert werden, giebt Coninx im Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1902, S. 746. Diesem Artikel ist auch die Figur 365 entnommen.

Durch die Normalien des Verbandes wurde dann aber ein Leitungsmaterial vorgeschrieben, welches sich auch bei der erhöhten Spannung anstandslos hält, und zwar wird nunmehr, wo Schnurleitungen verwendet werden, ausnahmslos mit Gummi umpresstes Material verwendet.

Die eigentliche Gefahr dieser Installation mit den vorher erwähnten schlechten Schnurleitungen lag nun keineswegs in Kurzschlüssen, die die Sicherungen in Thätigkeit gesetzt hätten, sondern in schleichenden Kurzschlüssen, die in Schalter- und Umschalterleitungen auftraten, wodurch die Sicherungen nicht durchschmelzen konnten.

Aus Fig. 365 ist ohne weiteres ersichtlich, dass bei einem Kurzschluss zwischen den Leiterteilen 1 und 2 bezw. 3, also an den Stellen *A* oder *B* der Verbrauchsapparat, in der Figur eine Glühlampe, kurzgeschlossen wird und infolgedessen ein energischer Kurzschlussstrom auftritt. Zwischen 2 und 3, also bei *C* wird dagegen nur der Schalter kurzgeschlossen, der Strom kann die Höhe des Verbrauchsstromes nicht überschreiten und es bildet sich

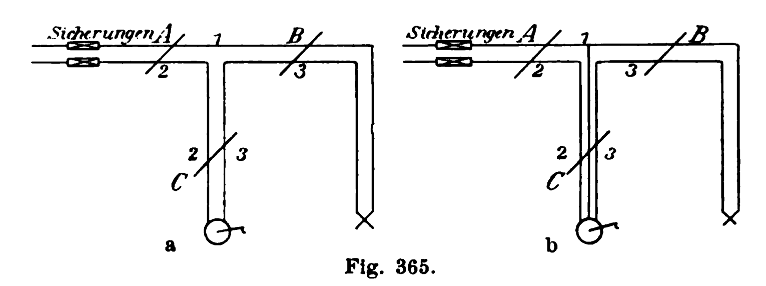


Fig. 365.

an dieser Stelle ein Lichtbogen, der die Isolierung in Brand setzen und in der Nähe befindliche brennbare Stoffe entzünden kann. Die Schalterleitung brennt nun von unten nach oben, die Sicherungen treten aber erst dann in Thätigkeit, wenn auch die Isolierung der Leitung 1 zerstört wird. Durch die Verwendung der vorerwähnten besser isolierten Leitungen sind nun an und für sich diese Gefahren ausgeschlossen, ebenso durch das Einziehen der Schalterleitungen in Rohre, die sowieso durch § 26b der Sicherheitsvorschriften verlangt werden. Coninx giebt nun an der bereits citierten Stelle eine Sicherheitsschaltung an, die in Fig. 365b erläutert ist. Die Leitung 1 wird nämlich mit 2 und 3 zusammen verseilt zum Schalter geführt, ohne jedoch selbst am Schalter angeschlossen zu werden. Tritt ein schleichender Kurzschluss zwischen 2 und 3 ein, so wird durch den hierbei entstehenden Lichtbogen die Isolierung der Leitung 1 ebenfalls angegriffen und sofort ein energischer Kurzschluss eingeleitet, der die Sicherungen in Thätigkeit setzt und die gefährdete Leitung stromlos macht. Es sei hierbei daran erinnert, dass die in der Praxis übliche und gern angewendete Verlegung zweier Leiter verschiedenen Potentials in dasselbe Rohr aus denselben Gründen erfolgt.

Durch geeignete Wahl des Leitungsmaterials, der Isolierung, der Schutzvorrichtungen u. s. w. wird aber auch hier die Feuersicherheit verbürgt.

255. Entflammbarkeit von Schnurleitungen.

Dass im übrigen eine Entflammbarkeit der Leitungen durch den elektrischen Strom bei gewissenhafter Berücksichtigung der Sicherheitsvorschriften nur bei sehr hohen Belastungen möglich ist, zeigt eine Arbeit[1]) von Herzog & Feldmann, der das Folgende entnommen ist.

1) ETZ 1904, S. 213.

Die Versuche wurden an einer Gummileitung S. B., geeignet zur Verlegung in trockenen Räumen bei Spannungen bis 125 Volt, durchgeführt. Jeder Leiter der Doppelschnur bestand aus 24 Kupferdrähten, 0·2 mm stark, so dass der Querschnitt der Doppelleitung $2 \times 0{\cdot}75$ mm² betrug. Die Isolation bestand aus einer Umspinnung von Baumwolle, einer Paragummibandumwickelung und zwei aufeinander folgenden Bespinnungen von Baumwolle und Zwirn. Hiernach entsprach zwar in Bezug auf Isolation, nicht aber auf Bildung des Querschnittes diese Leitung den deutschen Normalien, denn diese bezeichnen zwar 0·75 mm² als kleinsten zulässigen Querschnitt, fordern aber 0·3 mm als kleinsten Durchmesser der Kupferdrähte.[1])

Aus der Kurve *A*, Fig. 366, ist die Temperaturzunahme der Schnur bei einer Belastung mit 20 Amp. zu ersehen; die Steigerung der Temperatur betrug 4 Minuten nach dem Einschalten 70° C. Bei Kurve *B* wurden 25 Amp. angewendet und die Temperaturzunahme betrug gleichfalls nach 4 Minuten fast genau das Doppelte des vorherigen Wertes und bei 30 Amp. erhielt

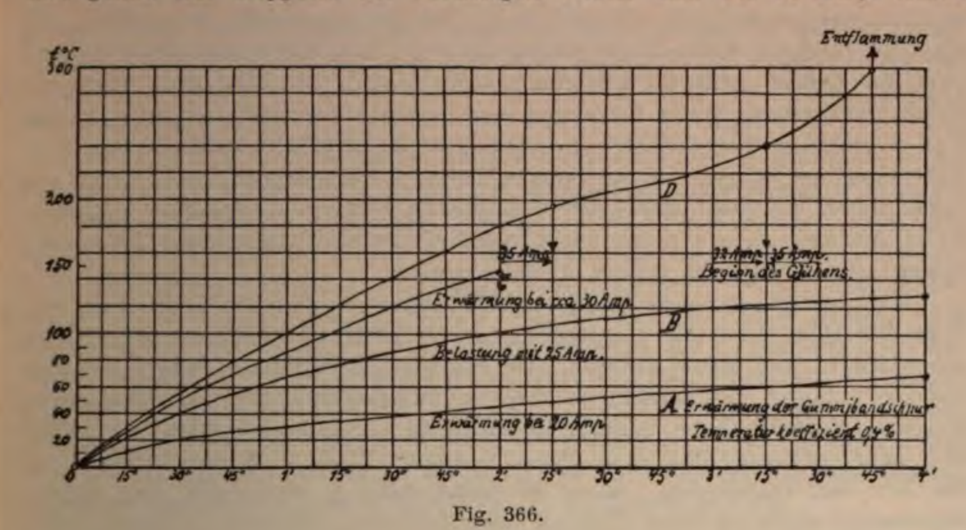


Fig. 366.

man schon nach 2 Minuten nach Kurve *C* eine Übertemperatur von 150° C. Kurve *D* zeigt, wie bei 35 Amp. Stromdurchgang nach 2 Minuten 15 Sek. die Temperatur 200° erlangt. Die nächste Folge würde eine Entflammung der Leitung vor Beendigung weiterer Beobachtungen sein; es wurde daher die Stromstärke von 35 Amp. auf 32 Amp. reduziert. Hierdurch stieg die Erwärmung innerhalb 1 Minute auf 240° C. und die Schnur begann zu glühen. Nunmehr erhöhte man die Stromstärke wieder auf 35 Amp. und infolgedessen ging die Schnur nach weiteren 30 Sekunden in Flammen auf. Die Temperaturzunahme ermittelte man durch Messung der Widerstandszunahme bei Annahme eines konstanten Temperaturkoeffizienten von 0·004.

Die Sicherheitsvorschriften gestatten im allgemeinen für Leiter mit 0·75 mm Querschnitt eine maximale Dauerbelastung von 4 Amp., wobei die Temperatur des Leiters bei andauernder Belastung um etwa 17° C. gegenüber der Umgebung steigt. Die Sicherungen müssen dabei auf das Doppelte des Maximal-

1) Vgl. Dr. Weber, Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften 1902, S. 123.

stromes, hier also 8 Amp., bemessen werden, in der Weise, dass dieselben bei dieser Stromstärke in 2 Minuten abschmelzen. Aus der Kurve bezw. dem Versuche geht hervor, dass aber in Wirklichkeit die Leitungsschnur selbst bei dem Vierfachen dieser Schmelzstromstärke innerhalb der 2 Minuten nicht in Brand gerät, vielmehr erwärmt sich dieselbe bei dauernder Belastung von 20 Amp. um 70 bis 80° C. Würde also statt der 4 Ampere-Sicherung eine solche für 10 oder 16 Amp. eingesetzt werden, so müssten diese in 2 Minuten bei 20 bezw. 32 Amp. durchschmelzen, ohne dass ein Brand der Leitung entstände. Es folgert hieraus, dass die infolge Kurzschluss in einer Leitung auftretenden Ströme, auch wenn sie den normalen Betriebsstrom wesentlich überschreiten, keinesfalls imstande sein können, die Isolation der Leitungsschnur ihrer ganzen Länge nach zu entzünden.

Tritt aber eine örtliche Entflammung ein, hervorgerufen durch beschädigte Isolation infolge herausgetretener einzelner Kupferdrähte oder anderer Umstände, so dass hierdurch ein elektrischer Lichtbogen hervorgerufen wird, so ist selbstverständlich nur eine relativ geringe Stromstärke notwendig, um einen derartigen Kurzschluss hervorzurufen. Die Sicherung kann hierbei ganz unversehrt bleiben, und man kann sich gegen derartige Übel nur durch Verwendung guter Leitungen und sachgemässe Installation schützen. Das Verknoten der Leitungen, Anstecken derselben mittels Stecknadeln, Aufhängen an Nägeln und Anwendung ähnlicher Kunstgriffe wird daher mit Recht durch die Bestimmung der Sicherheitsvorschriften unmöglich gemacht, da in Auslagen u. s. w., die leicht entzündbare Stoffe enthalten, Leitungen unbeweglich in Röhren verlegt werden müssen.

256. Elektrische Anlagen als angebliche Verursacher von Bränden.

Nun gehen in gewissen Interessentenkreisen die Ansichten über die Feuersicherheit oder die Feuergefährlichkeit einer elektrischen Anlage weit auseinander. Im ersten Stadium der Elektrotechnik wurde zwar den elektrischen Anlagen eine derartige Sicherheit nachgerühmt, dass sie in besonders ungünstigen Fällen jeder anderen Beleuchtung vorgezogen wurden; es zeigte sich aber zunächst, dass sich dieses Vertrauen noch nicht rechtfertigte, da die Art der Installation, dazu die unzuverlässig wirkenden Sicherungen keineswegs einen sicheren Zustand herbeiführten, vielmehr Zustände schuf, die nach unseren heutigen Begriffen sogar als feuergefährlich bezeichnet werden müssen. Dies wurde aber die direkte Veranlassung, die Installationstechnik besser auszubilden, tüchtige Kräfte heranzubilden, so dass mit Fug und Recht behauptet werden kann, die heutige Installationstechnik ist unstreitig in der Lage, Anlagen zu bauen, welche die grösstmögliche Gewähr gegen Feuerschäden bieten. Sie wird dabei unterstützt durch eine überaus reiche Auswahl der zuverlässigsten Apparate.

Trotzdem wird aber, meist von Feuerversicherungsgesellschaften, behauptet, dass verhältnismässig viele Brandfälle auf die elektrische Installation zurückzuführen seien, womit dann eine Erhöhung der Prämien begründet wird. Dabei ist aber auffällig, dass noch keine einzige der Feuersicherungsgesellschaften bisher eine Statistik darüber veröffentlicht hat. Auch sind die Gesellschaften im Begriff, neue Bedingungen aufzustellen, welche die Besitzer elektrischer Installationen insofern berühren, als sie vom Schadenersatz die elektrischen Installationen ausschliessen, wenn sie nachweislich die Ursache des Brandes gewesen sind. Als Begründung wird angeführt, dass die Gesellschaften nicht für die Beschaffenheit der elektrischen Apparate verantwortlich gemacht werden könnten, denn durch schlechte Lieferungen können

Brände herbeigeführt werden. Es wird also hier eine Ausnahme gegenüber anderen Beleuchtungsanlagen gemacht, da beispielsweise beim Bruch eines Gasrohres oder dergleichen Brände ebenfalls entstehen können, für die aber Schadenersatz geleistet werden muss. Es sei ein besonders charakteristisches Beispiel erwähnt:[1])

> „Eine grössere Hadern-Sortieranstalt in Süddeutschland besass seit Jahren in sämtlichen Räumen offene Flammen, hauptsächlich Petroleum-Beleuchtung. Die Anstalt ging, um die Sicherheit zu erhöhen, zur elektrischen Beleuchtung über. Die Anlage, welche durchaus modern und entsprechend den Verbandsvorschriften ausgeführt ist, wurde nachträglich durch die Feuerversicherungsgesellschaft beanstandet, indem dieselbe jetzt, nachdem die elektrische Installation vorhanden war, die Prämie erhöhen wollte."

Es sei auch darauf hingewiesen, dass bei jedem Brande an solchen Orten, wo sich elektrische Installationen befinden, die Schuld am Brande sofort der elektrischen Installation zugeschoben wird, wenn nicht eine andere Ursache klar zu Tage tritt.

Dies war der Fall bei dem Brand des Kgl. Theaters in Stuttgart, wobei als Beweis angeführt wurde, dass die elektrische Anlage beim Einschalten während des Brandes vollständig versagt habe. Nachträglich wurde aber einwandsfrei festgestellt, dass in dem Raum, in welchem der Brand entstanden war, elektrische Leitungen überhaupt nicht installiert waren. Gleiche Ursache wurde dem Brande des Barmer Stadttheaters zu Grunde gelegt, aber auch hier war die Behauptung vollständig sinnlos, da zu der Zeit, wo der Brand ausbrach, die gesamte Beleuchtungsanlage überhaupt vom Hauptnetz abgetrennt und absolut spannungslos war. Sämtliche Sicherungen waren bei der nachfolgenden Revision in Ordnung vorgefunden. Hätte das Theaternetz unter Strom gelegen, so wären sicher infolge der beim Brande auftretenden Kurzschlüsse die Sicherungen zum Teil in Thätigkeit getreten.

Es sind hier nur zwei besonders markante Fälle herausgegriffen, die Anzahl derjenigen Brände aber, deren Entstehungsursache der elektrischen Anlage zugeschrieben wird, ist überaus gross. Es ist nur erforderlich, die Statistiken der Feuerwehren durchzusehen, um sich hiervon zu überzeugen. Findet jedoch von einwandsfreier Seite eine Nachprüfung dieser Angaben statt, wie dies beispielsweise die Berliner Elektrizitätswerke mehrfach gethan haben, so lässt sich ohne grosse Schwierigkeiten die Haltlosigkeit der Behauptungen beweisen.

Im übrigen wird ganz unberechtigt „dem Kurzschluss" in allen Fällen eine unheilvolle Rolle zugeschrieben. Dies trifft aber in den meisten Fällen nur dann zu, wenn durch den beim Kurzschluss entstehenden Lichtbogen eine Entzündung irgend welcher brennbaren Stoffe oder in irgend einer Art eine Gefährdung von Personen erfolgen kann. In vielen Fällen wird sogar, wo die vorerwähnten Gefahren nicht zutreffen, ein gesunder Kurzschluss insofern sehr gute Dienste leisten, als hierdurch die vorgeschalteten Sicherungen in Thätigkeit gesetzt und der schadhafte Stromkreis sich selbstthätig

---

1) Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1902, S. 317.

abschaltet. An anderer Stelle wird sogar eine sogenannte Sicherheitsschaltung empfohlen, welche bezweckt, im Falle der Beschädigung einer zu Schaltern führenden Litzenleitung einen schleichenden Kurzschluss zu vermeiden und an seine Stelle einen energischen Stromübergang von einem Pol zum anderen herbeizuführen.

257. Massregeln bei Bränden des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

Wichtig ist noch die Frage, was zu geschehen habe, wenn in einem Gebäude, in welchem sich eine elektrische Anlage befindet, Feuer ausbricht.[1]) Nach Vorschlägen von Dr. Oskar May hat der Verband Deutscher Elektrotechniker hierfür die nachstehend wiedergegebenen Massregeln aufgestellt:

Massregeln bei Bränden.

Bei ausbrechenden Bränden sind an den elektrischen Installationen in den vom Brande betroffenen oder bedrohten Räumen folgende Massregeln zu empfehlen: [2])

A. Betriebsanlagen.

1. In vom Feuer betroffenen oder unmittelbar bedrohten elektrischen Betriebsanlagen ist der Betrieb durch das Betriebspersonal einzustellen. Das Eingreifen von mit dem betreffenden Betriebe nicht vertrauten Personen ist unzulässig.

2. Die Apparate sind so weit als möglich vor Löschwasser zu schützen.

3. Sind die Betriebsanlagen, welche zur Erzeugung von elektrischem Strome dienen, nicht unmittelbar vom Feuer bedroht, dann ist der Betrieb thunlichst aufrechtzuerhalten.

B. Installationen.

1. Alle Lampen in den vom Feuer betroffenen oder bedrohten Räumen sind — auch bei Tage — einzuschalten. Sie leuchten im Gegensatze zu allen anderen Beleuchtungsmitteln auch in raucherfüllten Räumen weiter und sind daher zur Erleichterung von Rettungsarbeiten unentbehrlich. Die Leitungen dürfen daher nicht abgeschaltet werden.

2. Vom Feuer bedrohte Elektromotorenbetriebe sind durch die damit betrauten Personen einzuschalten. Das Eingreifen von mit den betreffenden Betrieben nicht vertrauten Personen ist unzulässig.

3. Die Lösch- und Rettungsarbeiten der Feuerwehr sind ohne Rücksicht auf die elektrischen Installationen vorzunehmen. Nur soll das Be-

---

1) Dass im übrigen die Gefahr für die Feuerwehr beim Anspritzen stromdurchflossener Drähte nicht besonders gross ist, ist erwiesen (siehe ETZ 1903, S. 478); ausserdem ist das Anspritzen zu vermeiden, „weil es meistens nichts nützt, dagegen Kurzschlüsse herstellt und die Isolation verdirbt. Als geeignetes Löschmittel wird ausser trockenem Sand flüssige Kohlensäure in besonderen für Löschzwecke hergestellten Apparaten vielfach empfohlen." (Erläuterungen zu den Sicherheitsvorschriften für den Betrieb elektrischer Starkstromanlagen, herausgegeben von der Vereinigung der Elektrizitätswerke.)

2) Diese Ratschläge beziehen sich nur auf Gebrauchsinstallationen. Die an Freileitungen der Elektrizitätswerke in Brandfällen vorzunehmenden Massregeln sind nach den speziellen Verhältnissen vom Elektrizitätswerke mit der Feuerwehr zu vereinbaren.

spritzen von elektrischen Apparaten, Schalttafeln, Sicherungen, nach Möglichkeit vermieden und kein Leitungsdraht ohne zwingenden Grund durchhauen werden.

4. Sämtliche Einrichtungen, welche zum Anschlusse eines Elektrizitätswerkes gehören, wie Verteilungskästen, Elektrizitätszähler, Transformatoren, sind von der Feuerwehr unberührt zu lassen und deren Bespritzen mit Wasser ist zu vermeiden.

5. Beamte der Elektrizitätswerke, welche sich als solche legitimieren, erhalten Zutritt zur Brandstelle, um, wenn nötig, Transformatoren und deren Zubehör, sowie andere dem Elektrizitätswerke gehörige Teile stromlos zu machen. Den Anordnungen des Brandmeisters ist Folge zu leisten. Wenn an der Brandstelle Gefahr für die Beschädigung von Transformatoren oder deren Zuleitungen vorliegt, wird seitens der Feuerwehr der Betriebsdirektion des Elektrizitätswerkes auf dem schnellsten Wege Nachricht gegeben.

C. Wiederinstandsetzung.

Nach Beendigung der Löscharbeiten und vor Wiederingebrauchnahme der elektrischen Installationen sind durch fachmässig erfahrenes Personal oder durch einen Installateur

1. Die Hauptsicherungen bezw. die Kabelanschlüsse zu öffnen.

2. Die erhalten gebliebenen Teile der elektrischen Installationen auf weitere Brauchbarkeit zu untersuchen. So weit sich der Isolationszustand nicht als ausreichend erweist, und die durch die Isolationsmessungen gefundenen Fehler nicht beseitigt werden können, dürfen die Leitungen nicht weiter benutzt werden.

3. Die Installationen dürfen nicht eher wieder in Benutzung genommen werden, als bis sie wieder den Sicherheitsvorschriften entsprechen.

4. Bei Anschluss an ein Elektrizitätswerk sind bei diesen Wiederinstandsetzungsarbeiten die Vorschriften des Werkes zu beachten.

Die Gefährdung der Feuerwehr beim Anspritzen stromdurchflossener Drähte.

258. Versuche von Heinicke.

Vielfach ist nun behauptet worden, dass für die Mannschaften der Feuerwehren eine grosse Gefahr bestände, wenn sie stromdurchflossene Leitungen anspritzten. Um die Verhältnisse klarzustellen, hat Heinicke Versuche[1]) vorgenommen, bei denen er die Spannung zwischen dem gut gegen Erde isolierten metallenen Mundstück des Schlauches und der Erde mass, also diejenige Spannung feststellte, der gegebenenfalls der Körper des Mannes ausgesetzt sein könnte. Aus diesen Versuchen geht hervor, dass, selbst wenn Leitungen angespritzt werden, zwischen denen eine Potentialdifferenz von 6000 Volt besteht, die Gefahr nicht so gross ist, wie allgemein angenommen wurde. Schon in geringen Entfernungen von der angespritzten Leitung werden die gemessenen Spannungen so gering, dass der entstehende Strom zu einer Schädigung des Organismus kaum führen kann. Die Versuche wurden einmal mit gewöhnlichem, im vorliegenden Falle schlecht leitenden Wasser vor-

1) ETZ 1904, S. 478; 1905, S. 240.

genommen, das andere Mal mit solchem, dem absichtlich 0·5 % Soda zugesetzt war, um die Leitungsfähigkeit zu erhöhen. Die festgestellten Spannungen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle No. 22.

Entfernung zwischen Mundstück u. Leitung mm	Spannung 125 Volt		Spannung 240 Volt		Spannung 550 Volt		Spannung 6000 Volt	
	Reines Leitungswasser	Wasser mit 0·5 % Sodazusatz	Reines Leitungswasser	Wasser mit 0·5 % Sodazusatz	Reines Leitungswasser	Wasser mit 0·5 % Sodazusatz	Reines Leitungswasser	Wasser mit 0·5 % Sodazusatz
30	19	55	—	—	87	440	—	—
50	6	47	42	122	80	416	—	—
100	4	33	20	92	44	348	130	—
150	3	25	—	—	34	260	—	—
200	—	20	8	67	25	200	55	1000
300	—	15	5	47	18	146	20	900
400	—	12	4	43	12	—	15	800
500	—	10	3	36	5	66	—	238
750	—	6	1	24	1	48	10	100
1000	—	3	—	19	1·5	37	5	110
1250	—	—	—	14·5	—	28	—	65
1600	—	—	—	—	—	20	—	40
2000	—	—	—	—	—	10	—	12
2500	—	—	—	—	—	5	—	—
3000	—	—	—	—	—	—	—	—

Sachregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

Dritte Abteilung.

Berechnung von Leitungsnetzen

bearbeitet

von

B. Soschinski.

Mit 159 Abbildungen.



Vorwort.

Der vorliegende Band des Handbuches behandelt die Berechnung von Leitungsnetzen, die die Verteilung von in centralen Punkten erzeugter Energie auf ein grösseres Verbrauchsgebiet vermitteln. Doch sind hier nur diejenigen Netze berücksichtigt, die der Übertragung von Energie für Licht und mechanischen Antrieb in festen Verbrauchsstellen dienen; es sind also alle der Fortbewegung dienenden Verwendungsgebiete, d. h. Bahnanlagen, ausgeschlossen worden, da diese im Zusammenhang an anderer Stelle behandelt werden sollen.

Das mir vorschwebende Ziel für die Behandlung des Stoffes war, alle Methoden folgerichtig und übersichtlich unter möglichster Berücksichtigung und Anführung der einschlägigen Literatur zu entwickeln, die eine Berechnung von zusammenhängenden bisymmetrischen Netzen, wie sie allein zur Energieübertragung praktisch in Frage kommen, wirklich ermöglichen. Dagegen verbot es der mir zur Verfügung stehende Raum von selbst, auch die angrenzenden Gebiete zu berücksichtigen, so z. B. die Regelungsverfahren und die Verfahren zur Bestimmung von Netzfehlern.

Aus dieser Begrenzung meiner Aufgabe erklärt es sich, dass ich einerseits die für die Berechnung allgemeiner Netze (Wheatstonesche Brücke und dergl.) wertvolle Maxwellsche Maschenmethode, andererseits die graphischen Berechnungsmethoden nicht in den Kreis meiner Betrachtungen gezogen habe. Die erstere lässt sich auf bisymmetrische Netze nicht anwenden, weil sich die ihr zu Grunde liegende Forderung, das gesamte Netz, also positive und negative Netzhälfte samt Energieerzeugern und Verbrauchsapparaten in einer Ebene auszubreiten, ohne dass sich die einzelnen Leiter schneiden, nicht allgemein verwirklichen lässt; die letzteren können überhaupt nicht als Berechnungsverfahren für zusammenhängende Netze an-

gesprochen werden. Zur Erläuterung des Verhaltens einfacher unter Spannung stehender Leiter wurde die graphische Darstellung dagegen vielfach, besonders bei Wechselstromerscheinungen, herangezogen, da sie hier wertvolle Dienste leistet.

Dass die Darstellungen des eigentlich Neuen nur wenig bringen konnten, ist bei der Abgeschlossenheit und hohen Vollendung der Berechnungstheorien nicht verwunderlich. Neu ist nur der Abschnitt über den Ausgleich in zusammenhängenden Netzen.

Berlin, im November 1905.

B. Soschinski.

Inhaltsverzeichnis.

Die Parallelschaltung.

Wechselstrom-Stromkreise.

Die geschlossenen Zweileiter-Leitungsnetze.

Strom- und Spannungsverteilung in geschlossenen Netzen.

Gleichungsmethoden.

Die praktische Auflösung der Gleichungen.

Netzberechnung durch schrittweise Vereinfachung des Netzes.

Die Vereinfachung grosser Netze.

Die Netzberechnung auf Ausgleich.

Wechselstromnetze.

Die Querschnittsberechnung in geschlossenen Leitungsnetzen.

Die Mehrleitersysteme.

Das Dreileitersystem.

Das Fünfleitersystem.

Die Mehrphasensysteme.

Vergleich der Metallmengen der verschiedenen Leitungssysteme.

Vergleich der mit den verschiedenen Systemen erreichbaren Speisegebiete.

Messung der mittleren Netzspannung.

Nachweis der Hauptgleichungen.

Abkürzungen in Hdb. VI, 3

ETZ = Elektrotechnische Zeitschrift (Berlin).
Z. f. E. = Zeitschrift für Elektrotechnik (Wien).
L'Écl. Él. = L'Éclairage Électrique (Paris).
El. World = Electrical World and Engineer (New York).
TEICHMÜLLER, El. Leitungen = J. TEICHMÜLLER, Die elektrischen Leitungen. 1. Teil. Stuttgart, 1899.
HERZOG-FELDMANN, El. Leitungen = HERZOG-FELDMANN: Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze. Berlin. 1. Aufl. 1893; 2 Aufl. 1903.
GALILEO FERRARIS, Wissensch. Grundlagen = Wissenschaftliche Grundlagen der Elektrotechnik. Leipzig, 1901.

Zusammenstellung der durchgehend in Hdb. VI, 3 gebrauchten Symbole und ihrer Bedeutung.

E = Spannung (Volt) zwischen zwei Leitern.
$\mathcal{E}$ = Spannung (Volt) zwischen einem Leiter und dem neutralen Punkt des Systems oder Erde.
ε = maximaler Spannungsverlust (Volt); im besonderen: ε_ν Spannungsverlust bis zum ν^{ten} Abzweigpunkte; $\varepsilon_{\mu\nu}$ Spannungsverlust in der Strecke $\mu\nu$.
$\varrho_{\mu\nu}$ = Spannungsverlust (Volt) im Knotenpunkt μ (ν) des Netzes, wenn der Knotenpunkt ν (μ) allein mit der Stromeinheit belastet ist.
J = Stromstärke (Amp.); im besonderen: J_ν Belastungsstrom im Knotenpunkt ν; $(J_\nu)_l$ der dem Knotenpunkt ν von l aus zufliessende Teilstrom bezw. der auf l übertragene Teilstrom von J_ν; $J_{\mu\nu}$ Leiterstrom in der Strecke $\mu\nu$.
i = Abzweigstrom (Amp.); im besonderen: i_ν Abzweigstrom im Punkte ν einer Strecke; $i_{\nu l}$ der der Abzweigung ν von l aus zufliessende Teilstrom bezw. der auf l übertragene Teilstrom von i_ν.
j = Stromdichte (Amp. mm^{-2}); bei komplexen Grössen bedeutet j die imaginäre Einheit $\sqrt{-1}$.
$\dot{E}$, $\dot{\mathcal{E}}$, $\dot{\varepsilon}$, $\dot{J}$, $\dot{i}$ = Vektoren bei Wechselstromberechnungen.
E_w, $\mathcal{E}_w$, ε_w, J_w, i_w = Energiekomponente der Vektoren.
E_l, $\mathcal{E}_l$, ε_l, J_l, i_l = energielose Komponente der Vektoren.

$\mathfrak{E}$ = Energie, Leistung (Watt).
$\mathfrak{e}$ = Energieverlust (Watt).
w = OHMscher Leiterwiderstand (Ohm); im besonderen: w_ν Widerstand eines einfachen Leiters bis zum Abzweigpunkte ν, $w_{\mu\nu}$ Widerstand der Strecke $\mu\nu$.
r = Nutzwiderstand (Ohm).
Z, z = Impedanz (Ohm).
x = Reaktanz (Ohm).
ϱ = Spezifischer Widerstand (Ohm, m^{-1}, mm^2).
g = Leitfähigkeit (Ω^{-1}); im besonderen: g_ν und $g_{\mu\nu}$ wie vorher; $g_{\nu\nu}$ Summe der im Knotenpunkte ν zusammenlaufenden Leitfähigkeiten.
Y, y = Admittanz (Ω^{-1}).
b = Suszeptanz (Ω^{-1}).
L = Induktivität (Henry).
C = Kapazität (Mikrofarad).
A = Ableitung (Ω^{-1}).
l = einfache Länge (m) eines Leiters; im besonderen: l_ν und $l_{\mu\nu}$ wie oben.
q = Querschnitt (mm^2).
V = Volumen (cm^3) eines Leiters.
p = Frequenz (Perioden Sek.$^{-1}$).
ω = $2\pi p$ = Periodenzahl in 2π Sekunden.
φ = Phasenverschiebungswinkel.
[illegible] = vorwinklig.
[illegible] = nachwinklig.
e = Basis des natürlichen Logarithmensystems.

Druckfehler-Berichtigungen.

Seite 3 Zeile 6 von unten lies: Gleich- anstatt gleich
„ 14 „ 14 und 11 von unten lies: Watt-Std. anstatt Watt
„ 18 „ 8 von unten lies: $\mathfrak{E}$ = anstatt $\mathcal{E}$ =
„ 62 „ 1 „ „ „ $g - jb$ „ $g + jb$
„ 72 „ 2 „ „ „ OC „ $O\mathcal{E}$
„ 75 „ 14 „ „ „ (92) „ (105)
„ 81 „ 4—6 von oben lies: $\sum\limits_{\nu}^{n}$ „ $\sum\limits_{1}^{n}$
„ 87 „ 14 von oben lies: (107) „ (108)
„ 93 „ 12 „ „ „ Fig. 66a „ Fig. 67
„ 94 „ 14 „ „ „ $\sum\limits_{n}^{k+1} i_\nu < J_{II}$ „ $\sum\limits_{n}^{k+1} i_\nu J_{II}$
„ 203 „ 1 „ unten „ $\beta l^2 \sigma$ „ $\zeta \beta l^2 \sigma$
Infolgedessen ist in den Gleichungen der Seiten 204 und 205, sowie in den Gleichungen 201, 205 bis 208 und XXXIII bis XXXVI das ζ ebenfalls zu streichen.
„ 206 Zeile 2 von oben lies: $\frac{1}{2} l^2 \sigma$ anstatt $\frac{1}{2} \zeta l^2 \sigma$
„ 206 „ 5 „ „ „ $n_1 \zeta i E - 2 n^2 \zeta i E$ anstatt $n_1 i E = 2 n^2 i E$
„ 240 „ 2 „ unten „ kleiner anstatt grösser.

Wiewohl die Grundlagen zur Berechnung von Leitungsnetzen bereits mit dem OHMschen und den KIRCHHOFFschen Gesetzen seit dem Jahre 1825 bezw. 1846, besonders auch nach der Darstellung MAXWELLS in seinem Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus [1]) in unmittelbarer Anwendung auf verzweigte Stromleiter, vollkommen gegeben waren, entstanden die ersten hierauf bezüglichen theoretischen Arbeiten der elektrotechnischen Litteratur erst, nachdem bereits eine Reihe von Centralen gebaut und deren Netze verlegt waren; auch hier hinkte die Theorie der Praxis nach. Die ersten Netze wurden mangels theoretischer Grundlagen von den Praktikern nicht berechnet, sondern in einem verjüngten Modell dargestellt und an ihm durch Messung der Strom- und Spannungsverteilung ermittelt, welche der nach Gutdünken angenommenen Leiterquerschnitte geändert werden mussten. Eine Vorrichtung, durch die auf mechanischem Wege Querschnitt, Belastung und Spannungsverteilung eines Netzes an einem solchen Modell festgestellt werden kann, hat sich noch 1892 H. HELBERGER patentieren [2]) lassen, doch hat der Apparat keinerlei praktische Bedeutung erringen können, da, wie unmittelbar einleuchtet, diese Methode die teuerste und umständlichste unter allen Methoden der Netzdimensionierung ist.

Die erste Arbeit über Leitungsberechnung ist die von Sir WILLIAM THOMSON [3]) im Jahre 1881 erschienene Betrachtung über die Wirtschaftlichkeit von Leitungsanlagen; sie bezog sich jedoch nicht auf eigentliche geschlossene Netze, sondern auf offene Leiter. Ihr folgten in den Jahren 1883 ff. eine Reihe von Arbeiten,[4]) die denselben Stoff behandelten.

Die ersten theoretischen Veröffentlichungen über Berechnung von geschlossenen Leitungsnetzen waren die von C. HOCHENEGG in der Zeitschrift

---

1) Übersetzt von WEINSTEIN, 1883.

2) D. R. P. No. 68918 vom 5. April 1892; die Beschreibung siehe ETZ 1893, S. 495.

3) Siehe die Fussnote 1 auf S. 12.

4) W. SIEMENS, Vortrag über Berechnung von Leitungen siehe ETZ 1883, S. 109; vgl. auch die Fussnoten auf S. 12 u. 13.

für Elektrotechnik, Wien, vom Jahre 1887, die die später in seinem Lehrbuche[1] gesammelten graphischen Berechnungsmethoden behandelten. 1890 beschrieben HERZOG und STARK in der ETZ ihre Theorie der Schnittmethode, und nun war die Aufmerksamkeit der Theoretiker auf das fruchtbare Feld der Netzberechnung gelenkt. In rascher Folge erschienen die Arbeiten von MÜLLENDORFF, HERZOG-FELDMANN, COLTRI, TEICHMÜLLER u. a., die die verschiedenen, hier näher zu behandelnden Methoden der Leitungsberechnung entwickelten.

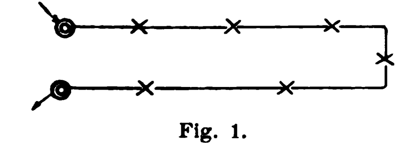
1) Siehe Fussnote 2 auf S. 13.

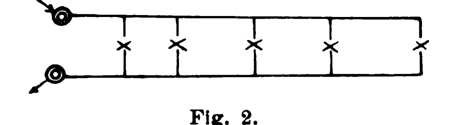
Die Berechnung offener Leitungen.

Die offene Leitung mit nur einer Belastung.

1. Nutzwiderstand und Leitungswiderstand.

Jede Energieübertragungsanlage besteht aus den Energieerzeugern, den Energieverbrauchern und den beide Gruppen verbindenden Leitungen. Die etwa zwischen den Erzeugern und Verbrauchern zwischengeschalteten Spannungs- oder Stromumwandler (Transformatoren, Umformer) erscheinen gegenüber den Energieerzeugern als Verbrauchsapparate, gegenüber den eigentlichen Verbrauchsapparaten als Erzeuger. Hier haben wir es nur mit der Bemessung der Leitungen zu thun, also mit der Berechnung der Leitungswiderstände, denen gegenüber die Verbrauchsapparate, die sich entweder nur als Widerstände darstellen (Glühlampen, Heizwiderstände) oder als Widerstände, die mit einer EMGK behaftet sind und durch einen äquivalenten Widerstand ersetzt werden können (Motoren, Bogenlampen, Transformatoren), als Nutzwiderstände bezeichnet werden, da in ihnen die nützliche Verwendung der zugeführten Energie vor sich geht.


Fig. 1.


Fig. 2.

2. Offene und geschlossene Leitungen.

Offene Leitungen sind solche, die eine nur einseitige Stromzuführung besitzen (Fig. 1 u. 2), während als geschlossene Leitungen ganz allgemein solche bezeichnet werden, die ihren Strom von zwei oder mehr Seiten her erhalten können, sei es, dass sie wirklich kreisförmig geschlossen sind und eine (Fig. 3) oder mehrere Stromzuführungen (Fig. 4) besitzen, sei es, dass sie aus nicht in sich geschlossenen Strängen bestehen, denen von allen freien Enden her Strom zugeführt wird (Fig. 5 u. 6).

3. Berechnung einer offenen Leitung mit einer Belastung.

Der einfachste offene Stromkreis ist der gleich- oder einphasige Wechselstromkreis mit nur einer Belastung (Fig. 7). Er besteht aus der Hin- und Rückleitung und dem Nutzwiderstande. Haben Hin- und Rückleitung den gleichen Widerstand, so zeichnet man gewöhnlich nur eine dieser Leitungen und deutet anstatt des Nutzwiderstandes den durch ihn verbrauchten Strom an (Fig. 8).

Das Gesetz, das die Berechnung einer solchen Leitung ermöglicht, ist das OHMsche Gesetz:[1])

$$E = J\Sigma w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Hierin ist $E = 2\,\mathcal{E}$[2]) die an den Klemmen des Stromkreises wirkende Spannung in Volt, J der Strom in Ampere und Σw der Gesamtwiderstand des Kreises in Ohm. Bezeichnen wir (Fig. 7) den Leitungswiderstand mit $2w$ (bei gleicher Hin- und Rückleitung also den Widerstand einer jeden mit w), mit $2r$ den Nutzwiderstand, so erhalten wir durch Anwendung der Gleichung (1) auf den Stromkreis von einer Klemme bis zum Nullpunkt des Systems

$$\mathcal{E} = Jw + Jr = \varepsilon + \mathcal{E}_1,$$

Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 5.

Fig. 8.

Fig. 7.

Fig. 6.

wo ε den Spannungsverlust (Potentialverlust) in einem Leiter, also 2ε den Spannungsverlust in der gesamten Zuleitung bei gleicher Hin- und Rückleitung,

1) Über die Entwickelung des OHMschen Gesetzes als Ausgleichsgesetz eines elektrischen Zwangszustandes und seine verschiedenen Formulierungen, sowie über die beiden KIRCHHOFFschen Gesetze siehe Hdb. I, 2. Es sei darauf hingewiesen, dass das OHMsche Gesetz in Wechselstromkreisen als Vektorgleichung aufzufassen ist.

2) Es soll allgemein mit $\mathcal{E}$ die Spannung eines Pols gegen den neutralen Punkt des Systems (Erde) bezeichnet werden, so dass bei Gleich- und einphasigen Wechselstromleitungen $E = 2\,\mathcal{E}$, bei Drehstromleitungen $E = \mathcal{E}\sqrt{3}$ ist.

und $E_1 = 2\mathcal{E}_1$ die an dem Verbrauchsapparat verfügbare Spannung, die Nutzspannung bedeutet.

Da nun der Widerstand (bezw. der äquivalente Widerstand) eines Verbrauchsapparates und die zu seinem Betrieb notwendige Spannung und Stromstärke Konstruktionsdaten und somit $\mathcal{E}_1 = Jr$ gegeben ist, so bleibt für die Berechnung des Leitungswiderstandes die Gleichung:

$$\varepsilon = Jw \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Nennt man ferner $2l$ die gesamte Länge, l die einfache Länge des Stromkreises in Metern, q den Leitungsquerschnitt in Quadratmillimetern und ϱ den spezifischen Widerstand des verwendeten Materials, d. h. den Widerstand für 1 m Länge und 1 mm^2 Querschnitt bei der gegebenen Temperatur in Ohm, so folgt:

$$w = \varrho \frac{l}{q} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Durch Kombination der beiden letzten Gleichungen erhalten wir

$$\varepsilon = \frac{lJ}{q} \varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (I)$$

Dies ist die Hauptgleichung, nach der die Berechnung der Leitungen erfolgt.

Für die Praxis ergeben sich nun zwei Fälle:

1. Die Querschnittsberechnung einer gegebenen Leitung (l bekannt), die bei gegebenem Spannungsverlust (ε) eine gegebene Zahl von Energieverbrauchern (J bekannt) mit Strom versorgen soll. Da mit der Wahl des Leitungsmaterials — es kommt für Leitungsnetze fast ausschliesslich Kupfer in Frage — auch ϱ bekannt ist, so wird

$$q = \frac{\varrho l J}{\varepsilon}.$$

2. Die Kontrolle einer bereits vorliegenden Leitung bezüglich ihres Spannungsverlustes. Hier sind l, q, ϱ und J bekannt, gesucht wird ε. Die Gleichung (I) kommt jetzt unmittelbar in der gegebenen Form zur Anwendung.

4. Die Kontrolle der Leiter auf Feuersicherheit.

Bezüglich der Kontrolle der Leiter auf Erwärmung ist bereits im ersten Teile dieses Bandes (Hdb. VI, 1, S. 21ff.) das Notwendige gesagt. Die zulässigen Belastungen für die Normalquerschnitte, wie sie durch den Verband Deutscher Elektrotechniker für isolierte und oberirdisch verlegte Kabel mit Ausschluss von Freileitungen und unterirdisch verlegten Kabeln festgesetzt worden sind, enthält die Tabelle No. 16 auf S. 24. Für unterirdisch verlegte Kabel hat der Verband Deutscher Elektrotechniker erst auf dem Verbandstage zu Kassel im Jahre 1904 die entsprechenden Zahlen festgelegt. Sie sind in der folgenden Tabelle I angeführt. Die übrigen einschlägigen Beschlüsse des Verbandstages lauten:

Die in der Tabelle angegebenen Stromstärken dürfen auf keinen Fall überschritten werden und gelten, so lange nicht mehr als zwei Kabel dicht nebeneinander im gleichen Graben in der üblichen Verlegungstiefe liegen. Mittelleiter werden nicht als Kabel betrachtet.

Tabelle I.

Belastungstabelle für einfache im Erdboden verlegte Gleichstromkabel bis 700 Volt mit und ohne Prüfdraht.

Querschnitt in mm²	Stromstärke in Amp.	Stromdichte Amp./mm²	Querschnitt in mm²	Stromstärke in Amp.	Stromdichte Amp./mm²
16	140	8·8	185	530	2·9
25	175	7·0	240	615	2·6
35	215	6·1	310	705	2·3
50	260	5·2	400	810	2·0
70	315	4·5	500	920	1·8
95	370	3·9	625	1040	1·7
120	420	3·5	800	1190	1·5
150	475	3·2	1000	1350	1·3

Der Tabelle ist als zulässige Übertemperatur 25° C. und eine Verlegungstiefe von 70 cm zu Grunde gelegt. Bei ungünstigen Abkühlungsverhältnissen, wie z. B. bei Anordnung von Kabeln in Kanälen und dergleichen, oder Anhäufung von Kabeln im Erdboden empfiehlt es sich, die Höchstbelastung auf $^3/_4$ der in der Tabelle angegebenen Werte zu ermässigen. —

Da für Freileitungen überhaupt keine Vorschriften vorhanden sind, so wird man sie am besten für eine Übertemperatur von gleichfalls ungefähr 25° C. berechnen. Wie die Versuche von KENELLY an Drähten, die bei ruhiger Luft im Freien aufgehängt waren (vgl. Hdb. VI, 1, S. 23), ergeben haben, decken sich für diese Erwärmung und für die bei Freileitungen in Frage kommenden Querschnitte von 10 bis etwa 100 mm² die unter diesen Bedingungen zulässigen Belastungen mit den in der Tabelle I angeführten Zahlen. Wir werden also im folgenden diese Belastungen allgemein als zulässig betrachten, wenn es sich um oberirdische oder unter Erde verlegte Leitungsnetze handelt.

Beispiele.

1. Es soll eine Gruppe von 20 Glühlampen, von denen jede bei 100 Volt Klemmenspannung 0·5 Amp. verbraucht, durch eine Leitung von $l = 50$ m Länge von einer Stromquelle aus gespeist werden, deren Spannung 102 Volt beträgt.

Hier ist also $2\varepsilon = 102 - 100 = 2$ Volt und $J = 20 \cdot 0{\cdot}5 = 10$ Amp., ferner ist bei der mittleren Temperatur von 20 bis 25° C. $\varrho = 0{\cdot}018$ (s. Tab. 1, Hdb. VI, 1, S. 3), da Kupferdraht verwendet wird. Es berechnet sich also der Querschnitt der Leitung zu:

$$q = 0{\cdot}018 \cdot \frac{50 \cdot 10}{1} = 9{\cdot}00 \text{ mm}^2.$$

Da in der Praxis jedoch fast ausschliesslich die vom Verband Deutscher Elektrotechniker festgelegten Normalquerschnitte (Tab. I und Hdb. VI, 1, S. 24, Tab. 16) auf Lager gehalten und verwendet werden, so wählen wir den nächst grösseren von 10 mm², entsprechend einem Durchmesser von 3·5 mm.

Hätte man bei dieser Leitung den Spannungsverlust zu kontrollieren, so würde sich ergeben:

$$2\varepsilon = 0{\cdot}018 \cdot \frac{2 \cdot 50 \cdot 10}{10} = 1{\cdot}80 \text{ Volt.}$$

Ein Blick auf die erwähnte Tabelle 16 zeigt schliesslich, dass auch der Bedingung der Feuersicherheit Genüge gethan ist, da Drähte von 10 mm² mit maximal 40 Amp. belastet werden dürfen.

2. Ein Einphasen-Wechselstrommotor von 10 KW Leistung soll in einer Entfernung von 1 km an eine Centrale mit 1026 Volt Betriebsspannung angeschlossen werden. Der Leistungsfaktor des Motors beträgt $\cos \varphi = 0{\cdot}90$, seine Nutzspannung 1000 Volt.

Die maximale Betriebsstromstärke berechnet sich zu

$$J = \frac{10\,000}{1000 \cdot 0{\cdot}90} = 11{\cdot}1,$$

die Nullspannung am Anfang der Linie zu $\mathcal{E}_0 = \frac{1026}{2} = 513$ und am Ende der Linie zu

$$\mathcal{E} = \frac{1000}{2} = 500 \text{ Volt.}$$

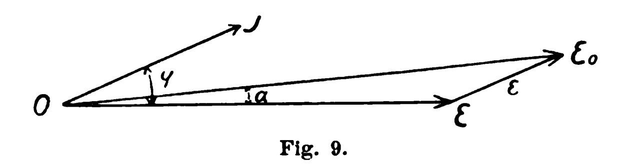


Fig. 9.

Da der Spannungsverlust ε die Richtung des Stromes hat, also dem Stromvektor J parallel ist (Fig. 9), so findet man

$$\varepsilon = \sqrt{\mathcal{E}_0^2 + \mathcal{E}^2 - 2\,\mathcal{E}_0\,\mathcal{E} \cos \alpha}$$
$$= \mathcal{E}_0 - \mathcal{E} = 13 \text{ Volt,}$$

denn in fast allen praktischen Fällen ist $\cos \alpha$ sehr nahe gleich 1. In unserem Falle würde, da $\varphi = 25^0 50'$ beträgt, $\alpha = 2^0 40'$, also $\cos \alpha = 0{\cdot}999$ werden. Demnach wird:

$$q = 0{\cdot}018 \cdot \frac{1000 \cdot 11{\cdot}1}{13} = 15{\cdot}4,$$

wofür wir aus den gleichen Gründen wie vorher $q = 16$ mm² wählen.

Die Elastizität einer Anlage.

5. Schwankungen der Nutzspannung.

Wie wir bereits gesehen haben, werden die Energieverbraucher (Lampen, Motoren) für eine bestimmte Spannung gebaut, die an ihren Klemmen vorhanden sein muss, damit sie gut arbeiten. Schwankungen in der Klemmenspannung werden das gleichmässige und gute Funktionieren der verschiedenen Apparate mehr oder minder beeinträchtigen und daher zu vermeiden sein. Der empfindlichste Verbrauchsapparat in dieser Beziehung ist die Glühlampe, bei der bereits plötzliche Spannungsschwankungen von mehr als 2 % Lichtschwankungen zur Folge haben, die sich für das Auge unangenehm bemerkbar machen. Die Grenze der zulässigen Spannungsschwankung einer Anlage, die Glühlampen speist, beträgt demnach 2 % der Nutzspannung. Wenn plötzliche Spannungsschwankungen nicht zu befürchten sind, wie in grösseren

Netzen, lässt man auch bis zu 3 % Spannungsverlust zu. Grössere Abweichungen der Nutzspannung von ihrem normalen Werte müssen durch Regelung der Maschinenspannung oder auf sonst eine Weise vermieden werden.

So entstehen bei einer Anlage, die mit konstanter Maschinenspannung betrieben wird, Spannungsänderungen an den Lampenklemmen, wenn einzelne der vorhandenen Lampen oder Gruppen solcher ein- oder ausgeschaltet werden, da hierdurch der Widerstand des Stromkreises und daher der die Leitung durchfliessende Strom geändert wird. Die Folge hiervon ist eine Zu- oder Abnahme des Spannungsverlustes (Gleichung (2) [3]), und somit erzeugt eine Vermehrung der Lampen eine Erniedrigung, eine Verminderung eine Erhöhung der Nutzspannung.

Beträgt der maximale Spannungsverlust zwischen den Klemmen der Maschine und denen der Lampen nicht mehr als 2 bezw. 3 % der Nutzspannung, so können offenbar ebensowohl alle Lampen als auch nur eine eingeschaltet sein, ohne dass eine Regelung der Maschinenspannung erforderlich wird. Anders dagegen, wenn der maximale Spannungsverlust zu mehr als 3 % berechnet ist.

6. Definition der Elastizität.

Wir wollen nun sagen: Die Leitungsanlage (oder auch ein Teil derselben) besitzt eine Elastizität von 100 % (genauer von $100 \cdot \frac{n-1}{n}$ %), wenn alle Lampen bis auf eine aus- bezw. eingeschaltet werden können, ohne dass die Klemmspannung mehr als 2 bezw. 3 % der Nutzspannung steigt oder fällt, und allgemein, die Elastizität beträgt $100 \cdot p$ %, wenn unter der gleichen Bedingung $p \cdot n$ Lampen aus- oder eingeschaltet werden können. Unter n ist die Anzahl der Lampen verstanden, für welche die Leitung berechnet ist. Offenbar beruht die Elastizität einer Anlage auf einem gewissen Verhältnis der Nutzwiderstände zu den Leitungswiderständen, wie bei den einzelnen Schaltungsarten noch näher gezeigt werden wird.

Wie ersichtlich, ist die Elastizität einer Anlage mitbestimmend für die Beurteilung ihrer Güte und Brauchbarkeit und daher für die Vergleichung verschiedener Netze mit ausschlaggebend.

Offene Leitungen mit verteilter Belastung.

7. Schaltungsarten.

Ist die Belastung örtlich verteilt, so kann die Schaltung, d. h. die Verbindung der verschiedenen Energieverbraucher durch die Leitungen in zwei wesentlich verschiedenen Arten erfolgen, nämlich in Hintereinander-, Reihen- oder Serienschaltung und in Nebeneinander- oder Parallelschaltung. Aus beiden Arten ergiebt sich durch Kombination die Gruppenschaltung.

Die Reihenschaltung.

8. Verbindung der Nutzwiderstände bei Reihenschaltung.

Bei der Reihenschaltung werden alle Nutzwiderstände zu einem einfachen Stromkreise vereinigt, indem jede Polklemme eines Apparates mit der eines andern bezw. mit einer Klemme des Energieerzeugers verbunden wird (Fig. 10). Da in einem einfachen Stromkreise nur eine Stromstärke herrschen kann, so müssen natürlich sämtliche Verbrauchsapparate für den gleichen Strom gebaut sein. Dagegen können die Spannungen der einzelnen Apparate verschieden

sein. Ist der Energieverbrauch eines Apparates, z. B. eines Motors, veränderlich, so wird auch die Spannung an seinen Klemmen veränderlich sein, da der Energieverbrauch bei konstanter Stromstärke der Spannung proportional ist.

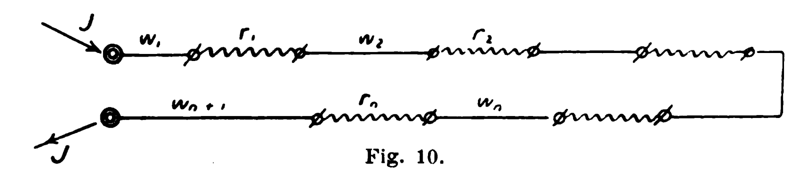


Fig. 10.

9. Berechnung der Leitung bei Reihenschaltung.

Ist Σr die Summe der eingeschalteten Nutzwiderstände bezw. bei Vorhandensein von EMGKK der äquivalenten Widerstände, Σw die Summe der Leitungswiderstände, ferner E die an den Klemmen des Stromkreises herrschende Spannung und J dessen Stromstärke, so ist nach dem zweiten KIRCHHOFF schen Gesetz:

$$E = J(\Sigma r + \Sigma w) = \Sigma E' + 2\varepsilon.$$

Hierbei bedeutet $\Sigma E'$ die Summe der Nutzspannungen und 2ε den Spannungsverlust in der ganzen Leitung. Sind also die Nutzspannungen gegeben, so muss die Maschinenspannung um den Spannungsverlust grösser gewählt werden. Auch hier ist wieder $J\Sigma r = \Sigma E'$ als durch die Energieverbraucher gegeben anzusehen, so dass für die Leitungsberechnung die Gleichung folgt:

$$2\varepsilon = J\Sigma w.$$

Hat die ganze Leitung die Länge $2l$ und den Querschnitt q, so wird

$$\Sigma w = \frac{2l}{q}\varrho$$

und

$$2\varepsilon = \frac{2l \cdot J}{q} \cdot \varrho \quad \ldots\ldots\ldots \quad (I)$$

Wir erhalten also zur Berechnung von ε oder q dieselbe Gleichung, wie früher bei dem offenen Leitungskreise mit einer einzigen Stromentnahme [3].

Beispiel.

Eine Strecke von 1000 m Länge (etwa die beiden Seiten einer Strasse von 500 m) soll durch 20 Glühlampen von je 32 HK und 100 Watt Energieverbrauch beleuchtet werden; die Lampen sollen gleiche Abstände von je 50 m

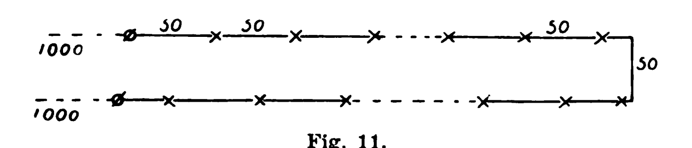


Fig. 11.

haben und die Entfernung der ersten und letzten Lampe vom Maschinenhause soll 1000 m (einfach) betragen (Fig. 11). Die zur Verfügung stehende Stromquelle habe eine Klemmspannung von 625 Volt, während die Lampen für eine Spannung von $E' = 30$ Volt und demgemäss für einen Strom von $J = 3{\cdot}3$ Amp. gebaut seien. Es soll der Querschnitt der Kupferleitung berechnet werden.

Da $2\varepsilon = 625 - 20 \cdot 30 = 25$ Volt, $2l = 3000$ m, $\varrho = 0{\cdot}018$ ist, so wird

$$q = \frac{3000 \cdot 3{\cdot}3}{25} \cdot 0{\cdot}018 = 7{\cdot}2 \text{ mm}^2 \doteq 7 \text{ mm}^2.$$

Dass diese Leitung auch der Feuersicherheit genügt, zeigt Tabelle I, S. 6.

Zur Zahlenrechnung sei bemerkt, dass bei allen Netzberechnungen eine Genauigkeit von etwa 1 % vollkommen ausreichend ist, da ja einerseits die der Rechnung zu Grunde liegenden Annahmen gewöhnlich bei weitem diese Genauigkeit nicht erreichen, andererseits wegen der beschränkten Zahl der gebräuchlichen und fabrikationsmässig hergestellten Kabelquerschnitte die Ergebnisse auf diese abgerundet werden müssen ([3] Beispiel).

10. Die Elastizität der Leitung bei Reihenschaltung.

Bisher wurde die Berechnung der Leitung unter der Voraussetzung durchgeführt, dass alle Lampen brennen. Ist nun die Bedingung gestellt, dass die Leitung bis zu einem gewissen Grade oder vollkommen elastisch sein soll, dass also ohne Änderung der Klemmspannung der Dynamo entweder eine gewisse Anzahl der Lampen oder alle bis auf eine abschaltbar sein sollen — was natürlich geschehen muss, ohne die Leitung zu unterbrechen, also indem die Klemmen der auszuschaltenden Lampen kurzgeschlossen werden —, so zeigt eine kurze Rechnung am vorhergehenden Beispiel, dass dieser Bedingung nicht genügt wird. Schalten wir eine Lampe ab, so vermindert sich die Summe der Nutzwiderstände, also auch der Gesamtwiderstand, da ja der Leitungswiderstand ungeändert bleibt. Ebenso bleibt die Maschinenspannung konstant, also muss der Strom und proportional zu diesem die Nutzspannung an den Lampen wachsen und es wird:

$$J_1 = \frac{E}{\Sigma w + (\Sigma r)_1}; \; E_1' = J_1 r.$$

Der (für verschiedene Stromstärken als konstant angenommene) Widerstand einer Lampe ist

$$r = \frac{E'}{J} = \frac{30}{3{\cdot}3} = 9{\cdot}1 \; \Omega,$$

derjenige der Leitung

$$\Sigma w = \frac{2l}{q} \cdot \varrho = \frac{3000}{7} \cdot 0{\cdot}018 = 7{\cdot}7 \; \Omega,$$

also wird

$$\Sigma w + (\Sigma r)_1 = 7{\cdot}7 + 19 \cdot 9{\cdot}1 = 180{\cdot}6 \; \Omega$$

und

$$J_1 = \frac{625}{180{\cdot}6} = 3{\cdot}46 \text{ Amp.},$$

während der normale Strom nur 3·3 Amp. beträgt. Die Lampen würden also schon bei Ausschaltung nur einer Lampe einen um $\frac{3{\cdot}46 - 3{\cdot}3}{3{\cdot}3} \doteq 0{\cdot}05$, also um 5 % zu hohen Strom erhalten, also nicht mehr gut funktionieren.

11. Berechnung der Leitung auf Elastizität bei Reihenschaltung.

Soll die Leitung einer Reihenschaltungsanlage auf Elastizität berechnet werden, so darf nach Abschnitt [6] und [10] die grösste Spannungs- bezw. Stromschwankung, die durch die Änderung der Lampenzahl hervorgerufen wird, höchstens 3 % der Nutzspannung bezw. der normalen Stromstärke betragen. Verlangen wir also allgemein eine Elastizität der Leitung von $100 \cdot p$ %, so erhalten wir als Bedingung für die Stromänderung:

$$J_1 - J \mathrel{\overline{<}} 0{\cdot}03 \, J \text{ oder } J_1 \mathrel{\overline{<}} 1{\cdot}03 \, J.$$

Nun ist für n installierte Lampen

$$\Sigma r = nr, \qquad (\Sigma r)_1 = (1 - p)\, nr$$

$$J = \frac{E}{\Sigma w + nr}, \quad J_1 = \frac{E}{\Sigma w + (1 - p)} nr,$$

woraus für den zu berechnenden Leitungswiderstand folgt:

$$\Sigma w \geqq \frac{1\text{·}03\, p - 0\text{·}03}{0\text{·}03} nr \quad \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

d. h. bei Reihenschaltung wächst der Widerstand einer elastischen Leitung mit der Anzahl und dem Widerstand der Energieverbraucher, sowie mit der Grösse der Elastizität. Verlangen wir also in unserm Beispiel [9] eine Elastizität von $50\,^0/_0\,(p = 0\text{·}5)$, so berechnet sich der Widerstand der Leitung zu:

$$\Sigma w \geqq \frac{0\text{·}485 \cdot 20 \cdot 9\text{·}1}{0\text{·}03} = 2950\,\Omega$$

und der Querschnitt zu:

$$q \leqq \frac{3000}{2950} \cdot 0\text{·}018 \leqq 0\text{·}0183 \text{ mm}^2.$$

Wie ersichtlich, führt die Bedingung einer auch nur mässigen Elastizität hier bereits zu Querschnitten, die weder der Feuersicherheit noch den Ansprüchen, die in bezug auf Festigkeit für die Verlegung der Leitung gestellt werden müssen, genügen. Da ferner der Spannungsverlust in der Leitung sich zu

$$2\,\varepsilon = J \Sigma w = 3\text{·}3 \cdot 2950 = 9735 \text{ Volt}$$

berechnen würde, so müsste die Klemmspannung der Dynamo

$$E = 9735 + 20 \cdot 30 = 10335 \text{ Volt}$$

betragen, und dieses Ergebnis führt uns auf einen weiteren Punkt, der bei der Berechnung von Leitungen berücksichtigt werden muss, nämlich auf den Wirkungsgrad bezw. die Wirtschaftlichkeit der Leitung.

12. Wirkungsgrad der Leitungen.

Der Wirkungsgrad η einer Leitung ist das Verhältnis der Nutzleistung zu der gesamten an die Leitung abgegebenen Leistung; also:

$$\eta = \frac{\Sigma E_1 J}{J^2 \Sigma w + \Sigma E_1 J} = \frac{\Sigma E_1 J}{EJ} \quad \ldots \ldots \quad (5)$$

oder da bei Reihenschaltung der gleiche Strom die Leitungs- und Nutzwiderstände durchfliesst,

$$\eta = \frac{\Sigma E_1}{E} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (5\text{a})$$

In unserem Falle würde sich demnach als Wirkungsgrad für die volle Belastung ergeben:

$$\eta = \frac{20 \cdot 30}{10335} = 0\text{·}058$$

d. h. die nutzbar verwendete Energie würde bei voller Belastung nur $5\text{·}8\,^0/_0$, bei halber Belastung sogar nur etwa $3\,^0/_0$ der gesamten erzeugten Leistung

betragen, was natürlich vom wirtschaftlichen Standpunkte betrachtet nicht zu rechtfertigen ist.

Wir sehen also, dass die Bedingung der Elastizität bei Reihenschaltung in jeder Beziehung zu unmöglichen Ergebnissen führt. Daher wird sie bei dieser Schaltungsart nicht berücksichtigt, sondern die Leitungen werden nur unter der Bedingung des günstigsten Spannungsverlustes [17] berechnet, sofern nur der so erhaltene Querschnitt der Feuersicherheit Genüge leistet. Dann muss aber natürlich bei willkürlicher oder zufälliger Abschaltung von Energieverbrauchern die dadurch entstehende Änderung der Stromstärke durch Regelung der Maschinenspannung ausgeglichen werden, die Maschine muss auf „konstante Stromstärke" reguliert werden, falls man es nicht vorzieht, dafür zu sorgen, dass automatisch an Stelle eines jeden abgeschalteten Nutzwiderstandes ein gleicher Ballastwiderstand tritt.

Die Wirtschaftlichkeit der Leitungsanlage.

13. Die Thomsonsche Regel und ihre Entwickelung.

Die ersten Betrachtungen über die Wirtschaftlichkeit von Leitungsanlagen sind von Sir WILLIAM THOMSON gelegentlich einer Studie über die Ausnützung der in der Natur vorhandenen Energiequellen im Jahre 1881 veröffentlicht worden[1]) und führten unter der Annahme, dass die Kosten für die Leitungen ihrem Gewicht proportional sind, also für blanke Kupferleitungen ohne Berücksichtigung der Verlegungskosten zur bekannten „THOMSON schen Regel", nach welcher der wirtschaftlich günstigste Querschnitt einer Leitung derjenige ist, bei dem die durch den Anlagewert bedingten Kosten für Verzinsung und Amortisation gleich denjenigen Kosten werden, die durch den jährlichen Energieverlust in der Leitung entstehen.

Die THOMSON sche Regel wurde nur kurze Zeit in ihrer ersten Form benützt,[2]) da die Erkenntnis, dass ihre allgemeine Gültigkeit wegen Nichtberücksichtigung einer Reihe von den wirtschaftlichen Querschnitt beeinflussenden Grössen beschränkt sei, bereits im Jahre 1884 zur Aufstellung der Formel von BERINGER[3]) und später zu der mit dieser identischen Formel von AYRTON und PERRY[4]) führten. Während THOMSON die Berechnung des wirtschaftlichen Querschnittes abhängig machte von der Stromstärke, mit der die Energie übertragen werden sollte, also den Strom als bekannt voraussetzte, benützten umgekehrt die letzteren die Spannung als gegebene und für die vorzunehmende Differentiation konstante Grösse. That-

---

1) Sir WILLIAM THOMSON, On the sources of energy in nature available to man for the production of mechanical effect. Report of the British Association 1881, S. 518.

2) A. BERINGER, Kritische Vergleichung der elektrischen Kraftübertragungen. Berlin, JULIUS SPRINGER, 1883. WALTENHOFEN, Z. f. E. 1884, giebt eine Umformung der von THOMSON aufgestellten Formel.

3) A. BERINGER, Die Dimensionierung elektrischer Leitungen, Z. f. E. 1884, S. 449.

4) AYRTON und PERRY, Journ. of the Society of Telegraph-Engineers and Electricians 1886, Bd. 15, S. 120. Vgl. auch HAMILTON KILGOUR, El. Engineer 1890, Bd. 6, S. 496; ETZ 1891, S. 124. ANTHONY, El. Engineer 1894, 31. Okt.; Z. f. E. 1895, S. 95. EDWARD W. BURCH, El. Railway Gazette 1895, S. 60; L'Écl. Él. Bd. 5, S. 117. HOSPITALIER, L'Industrie Él. 1894; The Electrician 1894, Bd. 34, S. 235. KAPP, Elektrische Kraftübertragung, JULIUS SPRINGER, Berlin.

sächlich lassen sich jedoch beide Formeln, wie TEICHMÜLLER[1]) gezeigt hat, ineinander überführen, sie sagen also dasselbe aus.

Die THOMSONsche Regel ist von HOCHENEGG[2]) unter Berücksichtigung aller die Wirtschaftlichkeit beeinflussenden Grössen erweitert und in ausserordentlich einfacher und eleganter Form dargestellt worden.

14. Begrenzung der Aufgabe.

Eine Leitung mit Rücksicht auf ihre Wirtschaftlichkeit berechnen heisst, ihren Querschnitt q oder, was dasselbe bedeutet, den in ihr auftretenden Energie- oder Leistungsverlust $\mathfrak{e}$ so bestimmen, dass die für die Herstellung der Leitung und ihren Betrieb dauernd aufzuwendenden jährlichen Kosten unter den gegebenen Verhältnissen ein Minimum werden. Es müssen also diese abhängig von $\mathfrak{e}$ oder q dargestellten Kosten nach einer dieser Variablen differenziert und der Differentialquotient gleich Null gesetzt werden, wodurch eine Gleichung erhalten wird, die den günstigsten oder, wie er gewöhnlich genannt wird, den „wirtschaftlichen" Wert der Veränderlichen ergiebt.

Da bei jeder Energieübertragung ein Teil der Energie durch den Transport als Wärme verloren geht, so haben wir zu unterscheiden zwischen der am Ort der Erzeugung vorhandenen, primären Leistung $\mathfrak{E}_0$ und der am Ort der Verwendung verfügbaren Leistung $\mathfrak{E}$, deren Differenz eben den durch die Übertragung verursachten Verlust $\mathfrak{e}$ bildet; also:

$$\mathfrak{e} = \mathfrak{E}_0 - \mathfrak{E} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (6)$$

Bei Berechnung des wirtschaftlichen Energieverlustes haben wir demnach zu unterscheiden, ob die erzeugte oder die nutzbare Leistung als gegeben vorauszusetzen und demnach der andere Teil zu berechnen ist. In jedem Falle lässt sich die unbekannte, zu berechnende Energie darstellen als Produkt aus einer Spannung E_0 oder E und einem Strom J, so dass also $\mathfrak{e}$ von zwei unabhängigen Veränderlichen abhängt. Schreiben wir die Gleichung (6) in der Form:

$$\mathfrak{e} = (E_0 - E)\, J, \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (6a)$$

so erkennen wir, dass E_0 und E die beiden Variablen sind, nach denen der als Funktion von $\mathfrak{e}$ dargestellte Ausdruck für die Leitungskosten partiell zu differenzieren ist, um das Minimum für $\mathfrak{e}$ zu erhalten, da je nachdem $\mathfrak{E}_0$ oder $\mathfrak{E}$ gegeben ist, J sich als

$$\frac{\mathfrak{E}_0}{E_0} \text{ oder } \frac{\mathfrak{E}}{E}$$

darstellen lässt.

15. Die Kosten der Leitung.

Die Anlagekosten einer Leitung setzen sich zusammen aus den eigentlichen Kosten der Leitung einschliesslich deren Verlegung und denen der erforderlichen Anschlussapparate. Die ersteren lassen sich in weiten Grenzen für jede Verlegungsart als lineare Funktion des Querschnittes darstellen, so dass der Preis eines Meters der Leitung sich schreiben lässt:

$$P = a + b\,q,$$

1) J. TEICHMÜLLER, Die Berechnung der Leitungen auf Wirtschaftlichkeit der Anlage, ETZ 1902, S. 190.

2) C. HOCHENEGG, Über Berechnung elektrischer Glühlichtleitungen, Z. f. E. 1887, S. 11, und Anordnung und Bemessung der elektrischer Leitungen, Berlin und München 1897, 2. Aufl.

wo a und b Werte sind, die zwar für verschiedene Verlegungsarten und verschiedene Isolation der Leitungen sich ändern, bei einem einmal gewählten Kabel und einer bestimmten Verlegungsart dagegen für verschiedene Querschnitte die gleichen sind. Bezeichnet ferner C den Preis der notwendigen Anschlussapparate, so ergeben sich die Leitungskosten für eine Leitungslänge $2\,l$ zu

$$(a + b\,q)\,2\,l + C.$$

a, b und C sind also in bezug auf die zu verwendende Spannung variabel, sie ändern sich aber nicht stetig, sondern sprungweise, da die verschiedenen den Preis beeinflussenden Kabelisolationen stets für einen grösseren Spannungsbereich hergestellt werden und ähnliches für die Anschlussapparate gilt.

Ist der Prozentsatz für Verzinsung, Amortisation und Instandhaltung der Leitungsanlage p_l (so dass z. B. bei 5 % $p = 0{\cdot}05$ wird), so betragen die jährlichen Kosten für diesen Teil:

$$p_l\,[(a + b\,q)\,2\,l + C].$$

Die in der Leitung auftretenden Energieverluste $\mathfrak{e}$ bedingen nun eine grössere Maschinenleistung, als der reinen Nutzleistung entspräche; die für diesen Teil der Maschinenkosten aufzuwendenden Amortisations- und Verzinsungsquoten müssen also gleichfalls den Leitungskosten zugerechnet werden. Betragen die Kosten der in Frage kommenden Maschinenanlage α Mark für 1 Watt — auch α, ebenso wie p_l sind von Spannung abhängig —, und ist für Verzinsung, Amortisation und Instandhaltung ein Prozentsatz p_0 aufzuwenden, so erhalten wir die für diesen Teil der Anlage einzusetzenden Kosten zu

$$p_0\,\alpha\,\mathfrak{e}$$

und somit für die gesamten durch das Anlagekapital bedingten „Stromfortleitungskosten"

$$p_l\,[(a + b\,q)\,2\,l + C] + p_0\,\alpha\,\mathfrak{e}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

16. Kosten der Energieverluste.

Der durch den Energieverlust bedingte Arbeitsverlust während der Zeit dt berechnet sich zu

$$\mathfrak{e}_t\,dt = i_t^2\,w\,dt \text{ Watt,}$$

wenn $\mathfrak{e}_t$ bezw. i_t veränderliche Augenblickswerte bedeuten. Wird dieser Ausdruck über den Zeitraum eines Jahres integriert und betragen die Betriebskosten der Anlage für 1 Watt β Mark, so ergeben sich die durch Stromwärme verursachten jährlichen Kosten zu

$$\beta \int \mathfrak{e}_t\,dt = \beta\,w \int i_t^2\,dt.$$

Da nun der Strom nicht für jeden Augenblick bekannt ist, besonders wenn es sich um eine erst zu projektierende Anlage handelt, so muss an Stelle des Integrals ein Wert gesetzt werden, der unter Benutzung von Erfahrungszahlen aus ähnlichen Betrieben eine einfache Berechnung der Betriebsverluste gestattet. Mit HOCHENEGG setzen wir als Näherungswert:

$$\int i_t^2\,dt \doteq J^2\,\Sigma\left(\frac{i}{J}\right)^2 t = J^2\,T, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

wo nunmehr i den während der Zeit t (z. B. während einer Stunde) als konstant betrachteten Mittelwert des Stromverbrauchs und J den Maximalwert

des Stromes, also entweder das Strommaximum im Jahre, oder denjenigen Strom, für den die Anlage (oder das Kabel) zu berechnen ist, bedeutet, und erhalten so als die jährlichen Kosten der Energieverluste:

$$\beta \mathfrak{e} T = \beta w J^2 T \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (9)$$

Die Zahl

$$T = \Sigma \left(\frac{i}{J}\right)^2 t \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (8a)$$

die Summe über das ganze Jahr genommen, heisst die „durchschnittliche Dauer der vollen Energieverluste im Jahre" und bezeichnet also diejenige Anzahl der Stunden, während der die volle Betriebsleistung in das Netz abgegeben werden müsste, um die gleichen Verluste zu erzielen, die bei dem thatsächlichen Betriebe während eines Jahres auftreten. Sie stellt eine Erfahrungszahl dar, die vermittels der in ähnlichen Betrieben erhaltenen Verbrauchskurven berechnet werden kann [28].

17. Die wirtschaftlichen Grössen.

Durch Summierung der beiden Teilwerte (7) und (9) ergeben sich die gesamten Stromfortleitungskosten:

$$K = p_l[(a + b q)\, 2l + C] + p_0\, \alpha \mathfrak{e} + T\beta \mathfrak{e} \quad . \; . \; . \quad (10)$$

Die beiden Veränderlichen q und $\mathfrak{e}$ sind nun voneinander abhängig, und wir können daher q durch $\mathfrak{e}$ ausdrücken, wenn wir schreiben:

$$q = \frac{2lJ^2}{\mathfrak{e}} \varrho = \frac{2l\varrho}{\mathfrak{e}} \left(\frac{\mathfrak{E}}{E}\right)^2 = \frac{2l\varrho}{\mathfrak{e}} \left(\frac{\mathfrak{E}_0}{E_0}\right)^2 \quad . \; . \; . \; . \quad (11)$$

je nachdem wir $\mathfrak{E}$ oder $\mathfrak{E}_0$ als gegeben annehmen. Wir müssen also von hier ab diese beiden Fälle getrennt behandeln.

1. Die nutzbare Energie $\mathfrak{E}$ ist gegeben.

Wir erhalten dann durch Einsetzung des letzten Ausdruckes für q aus (11) in Gleichung (10):

$$K = (p_0 \alpha + T\beta)\, \mathfrak{e} + p_l \left(\frac{2l\mathfrak{E}}{E}\right)^2 \varrho b \cdot \frac{1}{\mathfrak{e}} + 2lp_l a + p_l C \quad . \quad (12)$$

Die beiden Variablen, nach denen wir diese Gleichung zu differenzieren hätten, sind $\mathfrak{e}$ und E, doch müssten wir zu diesem Zwecke erst noch die Abhängigkeit der Grössen a, b, C, p_l und α von E mathematisch formulieren. Dies ist nun allgemein nicht möglich und Versuche in dieser Richtung[1]) haben zu keinem Erfolg geführt. Man verfährt daher in der Weise, dass man E konstant setzt und durch Differentiation nach $\mathfrak{e}$ den relativen wirtschaftlichen Energieverlust für eine bestimmte Spannung ermittelt. Durch Annahme andrer Werte für E und für die von E abhängigen Erfahrungswerte erhält man verschiedene Zahlenwerte von $\mathfrak{e}$, die graphisch zu einer Kurve vereint das gesuchte absolute Minimum zu ermitteln gestatten.[2]) Da in der Praxis die

---

1) Paul Boucherot, Sur le coût des lignes à haute tension. La Lumière Él. 1893, Bd. 50, S. 601. K. Schnetzler, Über die Grenzen der Hochspannung bei elektrischen Anlagen. Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1901, S. 250.

2) Vgl. J. Teichmüller, ETZ 1902, S. 190 und G. Semenza, Du calcul de la section la plus économique. L'Écl. Él. Bd. 41, S. 73. 1904.

Maschinen, Kabel u. s. w. für einen grösseren Spannungsbereich, also etwa bis 1000, für 1000 bis 5000 Volt u. s. w., mit gleicher Isolation gebaut werden, so werden die Preise derselben, also auch die Werte von a, b u. s. w., sich für bestimmte Werte von E sprungweise erhöhen; die Kurve $(\mathfrak{e}, E)$ wird also nicht kontinuierlich verlaufen, aber doch irgendwo ein Minimum zeigen. Es kann allerdings auch vorkommen, dass diese Kurve überhaupt kein absolutes Minimum ergiebt, z. B. dann, wenn man aus Gründen der Betriebssicherheit oder wegen andrer Erwägungen nicht zu entsprechend hohen Spannungen übergehen will oder kann. In diesem Falle wird man eben das durch den tiefsten Punkt der Kurve gegebene $\mathfrak{e}_w$ innerhalb des praktischen Spannungsbereiches wählen.

Differenzieren wir also für konstante E nach $\mathfrak{e}$, so erhalten wir als wirtschaftlichen Energieverlust:

$$\mathfrak{e}_w = \frac{2 l \mathfrak{E}}{E} \sqrt{\frac{p_1 b \varrho}{p_0 a + T\beta}} = 2 l \varrho \cdot \frac{\mathfrak{E}}{E} \sqrt{\frac{p_1 b / \varrho}{p_0 a + T\beta}}.$$

Die Grössen a und C kommen in dieser Gleichung nicht mehr vor, die wirtschaftlichen Grössen sind also von diesen beiden, die Anlagekosten beeinflussenden Faktoren unabhängig.

Hochenegg nennt $\sqrt{\frac{p_1 b}{\varrho}} = z_L$ die „Leitungszahl" und $\sqrt{p_0 a + T\beta} = z_B$ die „Betriebszahl", da der erste Ausdruck nur solche Konstanten enthält, die von der Leitungsanlage, der letztere nur solche, die vom Betrieb abhängen, und daher Erfahrungszahlen darstellen, die für alle ähnlichen Betriebe Geltung haben. Führen wir diese Abkürzungen ein, so ergeben sich für die wirtschaftlichen Grössen die folgenden einfachen Beziehungen:

$$\mathfrak{e}_w = 2 l \varrho \frac{\mathfrak{E}}{E} \cdot \frac{z_L}{z_B} = 2 l \varrho J \cdot \frac{z_L}{z_B} \qquad (13)$$

$$2 \varepsilon_w = \frac{\mathfrak{e}_w}{J} = 2 l \varrho \cdot \frac{z_L}{z_B} \qquad (14)$$

$$q_w = \frac{l J}{\varepsilon_w} \cdot \varrho = J \frac{z_B}{z_L} = \frac{\mathfrak{E}}{E} \cdot \frac{z_B}{z_L} \qquad (15)$$

und für die wirtschaftliche Stromdichte:

$$j_w = \frac{J}{q_w} = \frac{z_L}{z_B} \qquad (16)$$

18. Fortsetzung. Wie die letzte Gleichung zeigt, ist die wirtschaftliche Stromdichte unabhängig sowohl von der Höhe der zu übertragenden Energie als von der der Spannung und für gleiche Leitungsführung und gleiche Betriebsverhältnisse konstant. Wird ihr Betrag grösser, als der Bedingung der Feuersicherheit entspricht, so muss natürlich von der wirtschaftlichen Stromdichte Abstand genommen und die grösste zulässige Stromdichte angewendet werden.

ε_w ist ebenfalls von der Belastung unabhängig und wächst proportional mit der Länge der Leitung. ε_w, also auch $\mathfrak{e}_w$, kann daher bei sehr langen Leitungen sehr gross werden, so dass die zu erzeugende Leistung im Verhältnis zur nutzbaren Energie sehr gross, der Wirkungsgrad der Leitung mithin sehr klein werden würde. Auch in diesem Falle bleiben der berechnete

Energieverlust, der Querschnitt u. s. w. noch die „wirtschaftlichen“ Grössen dieser Anlage, d. h. jede andre Wahl dieser Grössen würde unter den bestehenden Verhältnissen die Kosten der Anlage vergrössern. Wenn nun auch die wirtschaftlichen Grössen die günstigsten sind, die man für die Dimensionierung der Leitung annehmen kann, so folgt natürlich daraus noch nicht, dass nun auch der Betrieb der Anlage gewinnbringend sein muss. Der Gewinn hängt ja nicht nur von den Ausgaben ab, die für die Berechnung der wirtschaftlichen Grössen allein massgebend waren, sondern auch von den Einnahmen, die durch den Betrieb herausgewirtschaftet werden können. Erst eine Gegenüberstellung der Einnahmen und Ausgaben vermag über den zu erzielenden Gewinn oder über die Möglichkeit, eine Anlage gewinnbringend zu betreiben, Aufschluss zu geben. Die Einhaltung der wirtschaftlichen Grössen verbürgt aber, dass bei gegebenem Verkaufspreise der nutzbaren Energie der erreichte Gewinn der grösste ist, der unter den gegebenen Verhältnissen erzielt werden kann.

2. *Die am Erzeugungsort vorhandene Energie ist gegeben.*

19. Fortsetzung.

Die sämtlichen Betrachtungen und Ergebnisse des ersten Falles bleiben bestehen, wenn $\mathfrak{E}_0$ an Stelle von $\mathfrak{E}$ und E_0 für E eingesetzt wird, da ja wegen Gleichung (11) auch dann die Gleichung (12) für K richtig bleibt.

Die Schlussgleichungen lauten dann:

$$\mathfrak{e}_w = 2\, l \varrho \frac{\mathfrak{E}_0}{E_0} \frac{z_L}{z_B} = 2\, l \varrho J \frac{z_L}{z_B} \quad \ldots\ldots \quad (13\,\text{a})$$

$$\varepsilon_w = l \varrho \frac{z_L}{z_B} \quad \ldots\ldots \quad (14)$$

$$q_w = \frac{\mathfrak{E}_0}{E_0} \frac{z_B}{z_L} = J \frac{z_B}{z_L} \quad \ldots\ldots \quad (15\,\text{a})$$

$$j_w = \frac{z_L}{z_B} \quad \ldots\ldots \quad (16)$$

20. Fortsetzung.

Auch die Folgerungen [18] bleiben bestehen, nur kann hier, da wir von einer bestimmten und begrenzten primären Energie ausgehen, der Fall eintreten, dass

$$\mathfrak{e}_w \geqq \mathfrak{E}$$

wird, dass also für den nutzbaren Verbrauch gar keine oder sogar weniger als keine, eine negative Energie übrig bleiben würde. Ein derartiges Ergebnis würde eben die Anlage als absolut unmöglich kennzeichnen. Ob eine Anlage für den Fall, dass

$$\mathfrak{e}_w < \mathfrak{E}$$

ist, gewinnbringend ausgenutzt werden kann, hängt auch hier von dem Wirkungsgrad, den Gestehungskosten und den Verkaufspreisen ab.

21. Berücksichtigung der Kosten anderer Teile der Anlage.

Bisher haben wir stets nur von den Kosten der Leitung, also von denen der Drähte oder Kabel einschliesslich ihrer Verlegung gesprochen. Müssen auch andere Teile der Anlage in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen einbezogen werden, so sind natürlich deren Kosten entsprechend in dem Ausdruck für K (Gleichung 10) [17] zu berücksichtigen.

Nehmen wir beispielsweise den Fall, es sei eine Wasserkraft zum mechanischen Antrieb einer Fabrik auf eine bestimmte Entfernung zu übertragen, so ist die zur Verwendung kommende Spannung bei direkter Übertragung ohne Benutzung von Transformatoren auf diejenige Höhe beschränkt, für welche noch Generatoren und Motoren betriebssicher gebaut werden können. Werden dagegen am Anfang und Ende der Leitung Transformatoren zur Erhöhung und Wiederherabsetzung der Spannung eingeschaltet, so verringern sich einerseits die Kosten für Anlage und Betriebsverluste der Leitungen, da ja J proportional mit der Zunahme der Spannung abnimmt, andererseits entstehen Mehrkosten für Anschaffung und Erhaltung der Transformatoren und Bestreitung der Betriebsverluste derselben. Bedeutet γ (Mark) die Kosten der Transformatoren für 1 Watt, p_t den für Amortisation u. s. w. aufzuwendenden Prozentsatz, $\mathfrak{a}_e$ den konstanten Arbeitsverlust, der während eines Jahres durch die Eisenverluste bedingt ist, $\mathfrak{e}_k$ den dem maximalen Betriebsstrom entsprechenden Energieverlust im Kupfer, der also nur während der Zeit T in Ansatz zu bringen ist, so ist der einem Transformator entsprechende Teil von K:

$$\gamma \mathfrak{E} p_t + a(\mathfrak{a}_e + T\mathfrak{e}_k),$$

welcher Betrag zu verdoppeln ist, falls, wie in unserem Falle, zwei Transformatoren aufzustellen sind.

In gleicher Weise lassen sich andere Fälle berücksichtigen.

22. Erweiterung der Ergebnisse auf Wechselstrom.

Die in diesem Abschnitt entwickelten Gleichungen gelten zunächst nur für Gleichstrom, da wir für den Strom J den Wert $\frac{\mathfrak{E}}{E}$ und als Leitungslänge die doppelte Entfernung l des Verbrauchsgebietes vom Erzeugungsort angesetzt haben. Mit entsprechenden Änderungen gelten sie aber auch für alle anderen Stromarten und Schaltungen.

Für einphasigen Wechselstrom ist nur der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ zu berücksichtigen, da die Leistung

$$\mathfrak{E} = EJ\cos\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

ist. Führt man die daraus erhaltene Stromstärke in die Gleichung (11) ein, so erkennt man leicht, dass die Gleichungen (13) bis (16) für einphasigen Wechselstrom gelten, wenn man $\frac{\mathfrak{E}}{E\cos\varphi}$ anstatt $\frac{\mathfrak{E}}{E}$ schreibt.

Bei Drehstrom wird, wenn E die (verkettete) Spannung zwischen zwei Leitungen bedeutet,

$$\mathcal{E} = \sqrt{3}\,EJ\cos\varphi = \mathcal{E}J\cos\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

während $3\,l$ an Stelle von $2\,l$, $3\,\varepsilon$ an Stelle von $2\,\varepsilon$ tritt. In den Gleichungen (13) bis (16) hat man demgemäss $\frac{1}{\sqrt{3}}\frac{\mathfrak{E}}{E\cos\varphi}$ für $\frac{\mathfrak{E}}{E}$, $3\,l$ für $2\,l$ und $3\,\varepsilon$ für $2\,\varepsilon$ einzusetzen.

Für Zweiphasenstrom mit verketteter Spannung E wird

$$J = \frac{\mathfrak{E}}{\sqrt{2}\,E\cos\varphi} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

der Strom in den Aussenleitern, während der Strom im Mittelleiter die Grösse $\sqrt{2}\,J$ annimmt und demgemäss zur Einhaltung der wirtschaftlichen Strom-

dichte dessen Querschnitt gleich dem $\sqrt{2}$fachen desjenigen der Aussenleiter gemacht wird. Daher wird

$$\mathfrak{e} = \frac{l J^2 \varrho}{q} (2 + \sqrt{2}) = 3{\cdot}41\, l \frac{J^2 \varrho}{q}.$$

An Stelle von $\frac{\mathfrak{E}}{E}$ tritt hier also $\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\mathfrak{E}}{E \cos \varphi}$ und $3{\cdot}41\, l$ an Stelle von $2\, l$.

Ist das Zweiphasensystem nicht verkettet, so haben wir zwei getrennte Einphasensysteme, von denen jedes die Hälfte der Energie führt. Es treten also hierbei alle Überlegungen für den Einphasen-Wechselstrom in Geltung.

23. Werte der Konstanten.

Für die Bemessung der einzelnen Erfahrungszahlen lassen sich natürlich allgemein nur Fingerzeige geben, genauere Berechnungen können nur auf Grund eingehender, die Eigenart der Anlage berücksichtigender Kostenanschläge vorgenommen werden.

Zunächst ist zu bemerken, dass nur ein Teil der Konstanten einer wirklichen Berechnung zugänglich ist, nämlich die Grössen a, b, C, α und auch β, da die Preise sowohl der zu installierenden Maschinen und Apparate als auch der für den Betrieb nötigen Materialien, die Höhe der Löhne u. s. w. an Hand von Preislisten und Erfahrungsdaten ähnlicher Anlagen genügend genau bekannt sind. Anders verhält es sich dagegen mit den Grössen p_l, p_0 und T, die gemäss ihrer Bedeutung der subjektiven Schätzung unterliegen und im mathematischen Sinne überhaupt nicht berechnet werden können. Ihre Werte werden daher je nach den Gesichtspunkten, von denen sich der Projektierende leiten lässt, oft recht verschieden ausfallen, und aus diesem Grunde erhält die Wirtschaftlichkeitsberechnung von Anlagen etwas Unsicheres, Unzuverlässiges. Dazu kommt noch, dass die nach den hier entwickelten Grundsätzen berechneten Querschnitte der Abrundung auf die fabrikationsmässig hergestellten Grössen unterliegen, und dass ferner jede Änderung der Grundlagen infolge Änderung der Betriebsverhältnisse die erhaltenen Ergebnisse ungültig machen kann.

Kann daher auch den Wirtschaftlichkeitsberechnungen keine allzu grosse Zuverlässigkeit zugeschrieben werden, so liegt doch ihr bedeutender Vorteil und ihr hoher Wert darin, dass sie allein geeignet sind, die Richtung anzugeben, in der der günstigste Erfolg für den Betrieb einer Anlage unter bestimmten Verhältnissen zu suchen ist, dass sie dem Projektierenden Einblick gewähren in den Zusammenhang der sich widersprechenden Bedingungen, und ihn veranlassen, das Gewicht der einzelnen gegeneinander abzuwägen. Ihre Anwendung empfiehlt sich um so mehr, als die Form ihrer Endgleichungen ausserordentlich einfach ist, sobald erst die nötigen Erfahrungszahlen zu Gebote stehen.[1])

24. Werte von a und b.

Der Preis von einem Meter verlegter Leitung war [15] dargestellt worden in der Form

$$P = a + b q,$$

wo P in Mark und q in mm^2 ausgedrückt ist. Wie bereits erwähnt, sind die wirtschaftlichen Grössen von dem Werte a unabhängig. In der folgenden Tabelle II sind die Werte von a und b für verschiedene Isolationen und Ver-

1) Vgl. hierzu auch H. CAHEN, ETZ 1902, S. 306 und 512; J. TEICHMÜLLER ebenda S. 462.

legungsarten niedergelegt, bezogen auf einen Elektrolytkupferpreis von 50 £ pro Tonne. Bei andrer Preisnotierung erhöht bezw. vermindert sich der Wert b um 0·0002 M. für jedes £ Differenz gegen den Grundpreis, so dass z. B. bei einem Preise des Elektrolytkupfers von 60 £ der neue Wert $b' = b + 0{\cdot}002$ wird. Ferner sind die Werte von a und b auch bei Mehrleiterkabeln nur auf eine Ader bezogen, so dass also der Preis eines Zweileiterkabels $2\,P = 2\,(a + b\,q)$, der des Dreileiterkabels entsprechend gleich

Tabelle II.

Werte von a und b bezogen auf einen Elektrolyt-Kupferpreis von 50 £ pro Tonne, wenn $P = a + bq$ und q in mm².[1])

Ausführung der Leitung	Maximale Betriebsspannung Volt	Mark für 1 m	
		a	b
1. Blanke Kupferleitung, unverlegt	—	0·00	0·0130
2. Dieselbe oberirdisch verlegt auf Telegraphenstangen mit Doppelglocken-Isolatoren			
a) 2 Drähte auf einem Gestänge	—	0·23	0·0130
b) 4 „ „ „ „	—	0·17	0·0130
c) 8 „ „ „ „	—	0·13	0·0130
3. Bleikabel mit doppelter Eisenbandarmierung, unverlegt	1000	0·80	0·0231
4. Dieselben, verlegt			
a) 2 Kabel in einem Graben	1000	3·10	0·0231
b) 3 „ „ „ „	1000	2·50	0·0231
c) 5 „ „ „ „	1000	2·10	0·0231
d) 7 „ „ „ „	1000	1·80	0·0231
5. Konzentrische Doppelkabel, armiert	1000	0·65	0·0247
6. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	1000	2·70	0·0247
7. Konzentrische Doppelkabel, armiert	3000	1·16	0·0255
8. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	3000	3·20	0·0255
9. Konzentrische Dreileiterkabel, armiert	1000	0·85	0·0224
10. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	1000	2·20	0·0224
11. Konzentrische Dreileiterkabel, armiert	2000	1·10	0·0246
12. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	2000	2·45	0·0246
13. Verseilte Zweileiterkabel, armiert	3000	1·30	0·0358
14. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	3000	3·35	0·0358
15. Verseilte Zweileiterkabel, armiert	5000	1·42	0·0385
16. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	5000	3·50	0·0385
17. Verseilte Zweileiterkabel, armiert	10000	2·04	0·0405
18. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	10000	4·15	0·0405
19. Verseilte Dreileiterkabel, armiert	3000	1·07	0·0281
20. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	3000	2·42	0·0281
21. Verseilte Dreileiterkabel, armiert	5000	1·30	0·0309
22. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	5000	2·65	0·0309
23. Verseilte Dreileiterkabel, armiert	10000	1·77	0·0323
24. Dieselben verlegt, 1 Kabel im Graben	10000	3·15	0·0323

1) Die Werte sind nach dem Deutschen Kalender für Elektrotechniker berechnet und entsprechen den Preisnotierungen des laufenden Jahres (1905). Vgl. auch **Leo W. Cohn** Beitrag zur Kostenberechnung elektrischer Leitungen, **ETZ 1902, S. 260.**

$3P$ ist. Die Werte gelten für Kabel mit Faserisolation, verlegt in Gräben von etwa 60 cm Tiefe, eingebettet in eine 20 cm hohe Sandschicht und mit Ziegelsteinen abgedeckt. Als Strassenpflaster ist gewöhnliches Granitpflaster vorausgesetzt.

25. Werte von C.

Der Wert von C umfasst die für jede Leitung nötigen Anschlussapparate, also Verteilungskästen, Verbindungsmuffen, Schalter, Sicherungen und etwaige zur Messung und Regelung von Strom und Spannung notwendige Apparate in der Centrale oder Unterstation. Da diese Kosten für verschiedene Anlagen sehr verschieden ausfallen, so ist es nicht möglich, für C einen allgemein gültigen Mittelwert anzugeben, man wird vielmehr diese Kosten für jeden Fall besonders berechnen.[1]) Dass diese Kosten auf die wirtschaftlichen Grössen keinen Einfluss haben, ist bereits festgestellt worden [17].

26. Werte von a.

In gleicher Weise kann ein genauerer Wert für a [15], d. h. für die Anlagekosten der Centrale bezogen auf 1 Watt Leistung, naturgemäss nur durch einen Kostenvoranschlag ermittelt werden. Hierbei ist nun zu bedenken, dass die Maschinen nicht für jede beliebige Leistung hergestellt werden, sondern nur in bestimmten Abstufungen, so dass häufig grössere als die der projektierten Leistung entsprechenden Maschinen gewählt werden müssen. Es entsteht dann die Frage, ob die Anlagekosten für die Leitungsverluste auch in diesem Falle den Leitungskosten zugerechnet werden sollen. Diese Frage ist im allgemeinen zu bejahen und unter allen Umständen stets dann, wenn die projektierte Anlage eine spätere Erweiterung voraussehen lässt, da ja die durch die Leitungsverluste in Anspruch genommene Leistung für die nützliche Energieabgabe nicht mehr zur Verfügung steht. Andererseits werden die Anlagekosten für die Centrale dann überhaupt nicht oder jedenfalls nicht voll in Anrechnung gebracht werden dürfen, also a wird gleich oder nahe gleich Null gesetzt werden können, wenn die Maschinenanlage schon für andere Zwecke vorhanden war und nun etwa zur Beleuchtung eines Ortes während der Nachtstunden herangezogen werden soll.

Der als Reserve projektierte Teil der Anlage ist wohl bei den Kosten, aber nicht für die Leistung in Betracht zu ziehen, so dass, wenn eine Maschinenanlage für 1000 KW, nämlich 4 Dampfmaschinen, 4 Kessel und 4 Dynamomaschinen von je 250 KW, einschliesslich Grunderwerb, Fundamente und Rohrleitungen u. s. w. 80000 Mk. kostet, und 1 Satz der Maschinen als Reserve vorgesehen ist, die Anlagekosten für 1 Watt betragen:

$$a = \frac{80\,000}{3 \cdot 250 \cdot 1000} \doteq 1 \text{ Mk.}$$

Je nachdem die Anlage mit Dampf- oder Wasserkraft betrieben werden soll, wird a sehr verschiedene Werte annehmen; besonders bei Wasserkraftanlagen bewegen sich die Anlagekosten in ausserordentlich weiten Grenzen je nach den auszuführenden Wasserbauten, so dass hierfür keine Mittelwerte angegeben werden können. Bei Dampfbetrieb kann man für überschlägliche Rechnungen je nach der Grösse der Anlage und Höhe der Betriebsspannung

---

1) Preiszusammenstellung für die einzelnen Teile von Anlagen, die für Überschlagsrechnungen Anhalt gewähren, finden sich in: Fritz Hoppe, Wie stellt man Projekte . . . auf? Darmstadt und Leipzig 1904, 3. Aufl., und: Was lehren die Statistiken der Elektrizitätswerke? ebenda 1903 (Mittelwerte ausgeführter Centralen). Herzog-Feldmann, Handbuch der elektrischen Beleuchtung, Berlin und München 1901, 2. Aufl. Carl Heim, Die Einrichtung elektrischer Beleuchtungsanlagen, Leipzig.

a zwischen 0·9 und 1·7 Mk. ansetzen. Der entsprechende Wert für die Anlagekosten bei Akkumulatoren ist 0·5 bis 0·8 Mk.

27. Werte von β. Die Betriebskosten für eine erzeugte Wattstunde, also der Wert β [16], enthalten die Betriebsmaterialkosten (Kohlen, Schmier- und Putzmaterial u. s. f.), Löhne und Verwaltungsunkosten, die nach den örtlichen Verhältnissen verschieden sein werden, und hängen ausserdem von der Grösse und der mehr oder minder günstigen Belastung der Antriebsmotoren sowie von der Betriebsart ab, also ob Wasser, Dampf oder Gas die Antriebskraft bilden.

Der billigste Betrieb wird natürlich im allgemeinen bei Wasserkraftanlagen zu erreichen sein, sofern bei diesen, abgesehen von dem Anlagekapital bezw. von der zu zahlenden Miete, nur Löhne, Schmier- und Putzmaterial als Betriebskosten zu berücksichtigen sind. Nur in dem Falle, dass kostspielige Wasserbauten oder wegen ungünstiger Wasser- und Eisverhältnisse grosse Ausgaben für Reparaturen der Stau- und Kanalanlagen in Frage kommen, oder wenn die Energiequelle sehr weit von der Verbrauchsstelle entfernt ist, wird eine Wasserkraft weniger rentabel werden können, als eine Dampfanlage. Die Entscheidung wird dann natürlich nur auf Grund einer eingehenden Berücksichtigung aller Verhältnisse zu gewinnen sein. Je nach der Grösse der Anlage kann man bei Überschlagsrechnungen in normalen Fällen für β den Wert 20 bis $100 \cdot 10^{-6}$ Mk. einsetzen.

Bei Dampfanlagen ist neben der Grösse der Maschinenaggregate die Belastung derselben ausschlaggebend. Müssen die Maschinen während eines grossen Teiles des Tages schwach belastet laufen, so wird der Kohlenverbrauch sehr viel grösser ausfallen, als wenn dieselben bei stets voller oder doch nahezu voller Belastung arbeiten. Ist also der Energieverbrauch bei Tage bezw. in den späten Nachtstunden gegenüber der Hauptbetriebszeit sehr klein, so wird man neben den grossen Maschinensätzen auch ein diesem Verbrauch entsprechendes kleineres Aggregat aufstellen, falls man es bei Gleichstromanlagen nicht vorzieht, Akkumulatorenbetrieb vorzusehen und dadurch eine stets volle Belastung der Maschinen zu ermöglichen. Ausgeführte Anlagen haben je nach Grösse und Verhältnissen für β den Wert 100 bis $200 \cdot 10^{-6}$ Mk. ergeben.[1])

28. Werte von T, τ und $\mathfrak{T}$. Die Zahl T, die durchschnittliche Dauer der vollen Energieverluste im Jahre [16], war definiert durch die Gleichung

$$T = \Sigma \left(\frac{i}{J}\right) t \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (8a)$$

In praktischen Fällen ermittelt man sie in der Weise, dass man für einige wenige typische Tage des Jahres, etwa den längsten und kürzesten Tag, die im allgemeinen mit dem Tage der schwächsten und stärksten Belastung zusammenfallen, und vielleicht für weitere 4 bis 6 gleichmässig über das Jahr verteilte Tage die Verhältnisse $\left(\frac{i}{J}\right)^2$ über 24 Stunden summiert und die Gesamtsumme durch die Anzahl der Beobachtungstage dividiert und mit 365 multipliziert.[2])

---

1) Angaben über Kohlen- und Ölverbrauch, sowie Löhne bei ausgeführten Anlagen siehe UPPENBORNS Kalender, sowie FRITZ HOPPE, Was lehren die Statistiken . . .

2) Vgl. GRAWINKEL und STRECKER, Hilfsbuch für die Elektrotechnik, Berlin. Belastungsdiagramme ausgeführter Centralen finden sich in den Jahrgängen 1898 ff. der ETZ.

Leider geben die in der ETZ jedes Jahr veröffentlichten Statistiken der bestehenden Elektrizitäts-Werke über diese Zahl keinerlei Aufschluss, so dass Mittelwerte für die verschiedenen Klassen von Anlagen nicht zur Verfügung stehen. HOCHENEGG berechnet in seinem bereits erwähnten Buche auf Grund von Betriebsangaben, die sich über ein Jahr erstrecken, für eine Beleuchtungs-Centrale von ungefähr 10000 angeschlossenen Lampen eine durchschnittliche volle Verlustdauer von etwa 500 Stunden, bei einer Dauer des vollen Betriebes (siehe weiter unten) von $\mathfrak{T} = 1200$ Stunden und einer maximalen gleichzeitigen Belastung von $60\,^0/_0$ der angeschlossenen Lampen. O. v. MILLER und W. H. LINDLEY ermitteln für die Centrale von Frankfurt am Main[1]) bei einer Maximalbelastung von 21000 Lampen $T = 400$ und $\mathfrak{T} = 1200$. Die dieser Berechnung zu Grunde liegenden Diagramme sind in den Fig. 12 bis 15 dargestellt.

Von der durchschnittlichen Dauer der vollen Energieverluste ist zu unterscheiden die „jährliche Betriebsdauer der Anlage“ τ, d. h. die Anzahl der Stunden im Jahre, während der die Anlage im Betriebe ist — bei ununterbrochenem Betriebe ist $\tau = 8760$ Stunden —, und die „durchschnittliche jährliche Dauer des vollen Betriebes“ $\mathfrak{T}$, d. h. diejenige Zahl von Stunden, während der die maximale Anzahl der gleichzeitig brennenden Lampen im Betrieb sein müsste, um die gleiche Zahl Lampenbrennstunden zu erzielen, die durch den thatsächlichen Betrieb geleistet wird. Es ist also:

$$J\mathfrak{T} = \int i\,dt = \Sigma i t$$

genommen über das ganze Jahr, oder

$$\mathfrak{T} = \int\left(\frac{i}{J}\right)dt = \Sigma\left(\frac{i}{J}\right)t \qquad \text{. . . . . . . (20)}$$

Die erste Zahl, τ, ist wichtig für die Berechnung der Betriebskosten, die letzte Zahl ist nötig, um bei gegebenem Verkaufspreise die Einnahmen der Centrale berechnen zu können. Sie hat nach den Ergebnissen der bereits erwähnten Statistik die folgenden Mittelwerte:[2])

Tabelle III.

Durchschnittliche jährliche Dauer des vollen Betriebes $\mathfrak{T}$ in Stunden.

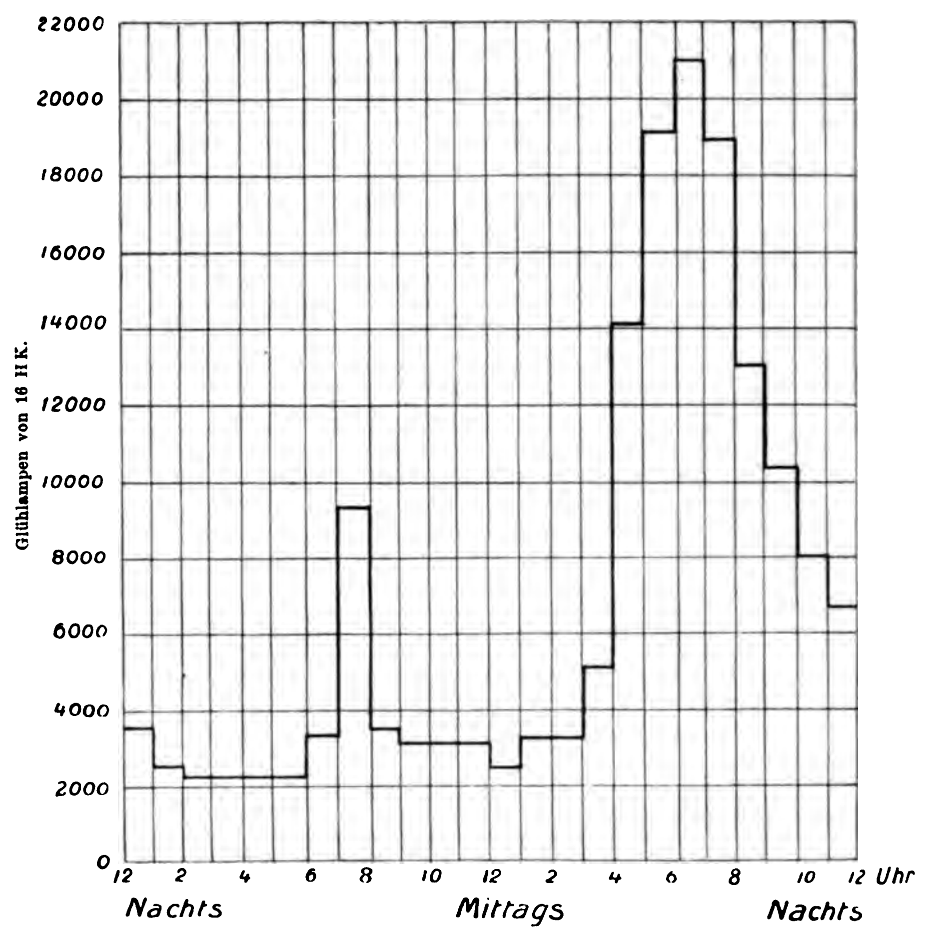
Städte	Für Beleuchtung	Für gewerbliche Zwecke
unter 10000 Einwohner	375	420
10000 bis 30000 Einwohner . . .	352	510
30000 „ 50000 „ . . .	285	592
50000 „ 150000 „ . . .	320	477

Für die verschiedenen Verbrauchsklassen ergiebt sich ferner im Mittel aus 22 Centralen die folgende durchschnittliche jährliche Benutzungsdauer aller angeschlossenen Lampen gleicher Klasse[2]) (siehe Tab. IV):

---

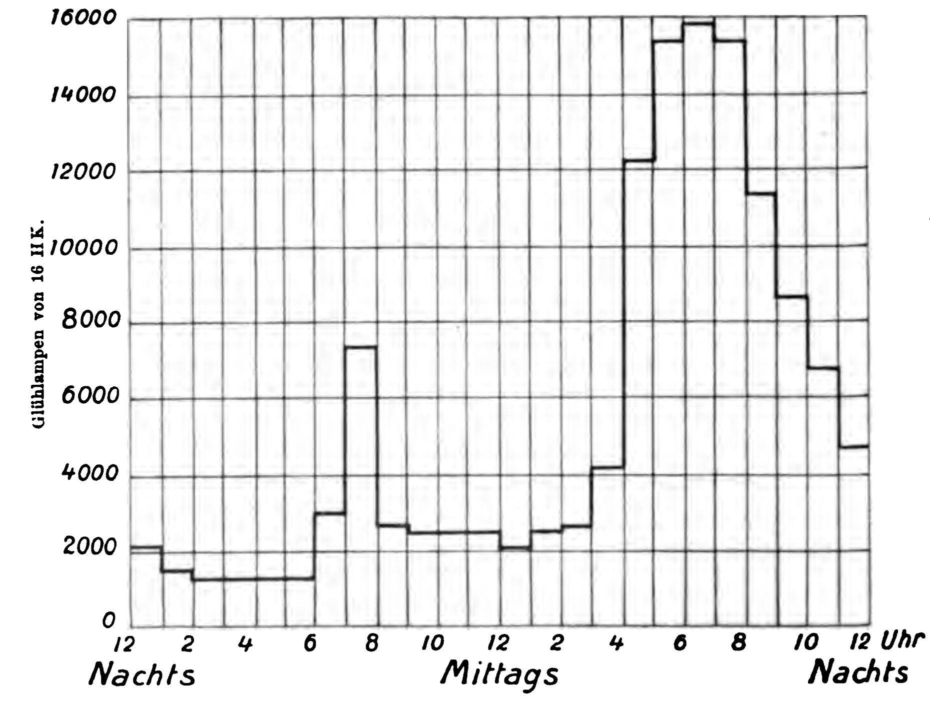
1) O. v. MILLER und W. H. LINDLEY, Elektrizitätswerk Frankfurt am Main, Gutachten und Projekte, 1892.

2) S. FRITZ HOPPE, Was lehren die Statistiken . . .



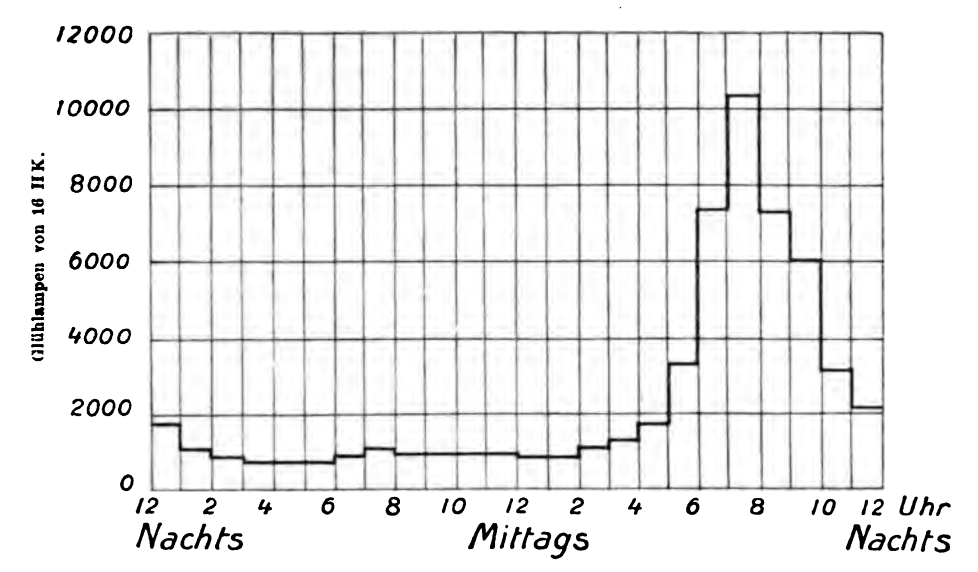
Stromverbrauch am 24. Dezember (Maximalverbrauch).

Fig. 12.



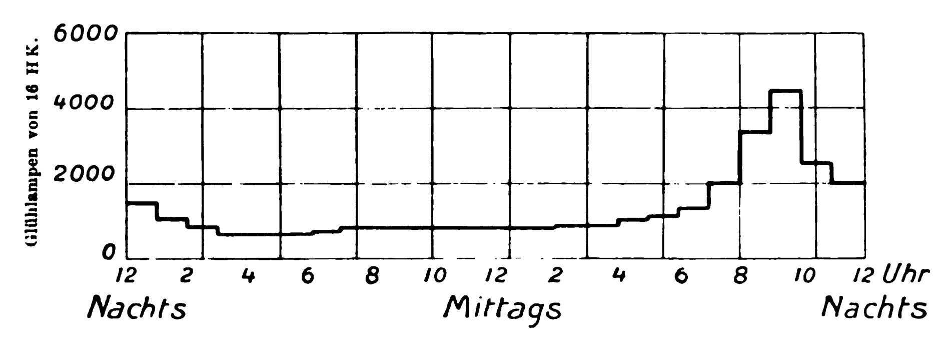
Stromverbrauch in den Wintermonaten November, Dezember, Januar.

Fig. 13.



Stromverbrauch im Frühjahr und Herbst: Februar bis April, August bis Oktober.

Fig. 14.



Stromverbrauch in den Sommermonaten Mai, Juni, Juli.

Fig. 15.

Tabelle IV.

Durchschnittliche jährliche Betriebsdauer elektrischer Lampen verschiedener Verbraucher.

Art der Lampen	Stunden
Bahnhöfe und Postämter	1766
Öffentliche Beleuchtung	1750
Gasthöfe, Restaurants, Cafés	482
Ladengeschäfte	384
Fabriken, Werkstätten, Lagerräume . .	336
Banken, Geschäftsräume	323
Theater, Vergnügungslokale	300
Heil- und Pflegeanstalten	227
Museen, Kirchen	127
Wohnungen	113

Wichtig für die Netzberechnung ist schliesslich noch der „maximale gleichzeitige Energiebedarf“ im Verhältnis zu demjenigen der gesamten angeschlossenen Verbrauchsapparate. Er beträgt im Mittel bei Städten von

unter 10000 Einwohner	35 %
10000 bis 50000 Einwohner . . .	31 %
50000 „ 150000 „ . . .	37 %

29. Werte von p_l und p_v.

Die zur Errichtung und zum Betrieb eines Elektrizitätswerkes nötigen Mittel werden im allgemeinen auf zwei Arten aufgebracht: entweder durch Anleihe (Stadtverwaltung, Unternehmergesellschaft) oder durch Aktienunternehmen. Im ersten Falle soll das geliehene Kapital (auch das aus eigenen Mitteln bereit gestellte Kapital ist als zu dem vorliegenden Zwecke „geliehen“ zu betrachten) durch Zahlung (Abschreibung) einer jährlichen Quote in einer bestimmten Zeit verzinst und amortisiert werden, im anderen Falle muss das Aktienkapital nach Erlöschen der Konzession, also ebenfalls nach einer bestimmten Zeit den Aktieninhabern zurückgezahlt werden. Da auch im letzten Falle die Zinsen für das Anlagekapital zu den Betriebskosten zu rechnen sind, so ist in beiden Fällen durch den Betrieb jährlich ein bestimmter Teil des Kapitals zu erbringen, der sich nach der folgenden Formel berechnet:

$$K(1+q)^n - pK\frac{(1+q)^n - 1}{q} = K - k$$

oder:

$$p = \frac{k}{K}\,\frac{q}{(1+q)^n - 1} + q \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (21)$$

Hierin bedeutet p den Prozentsatz des Anlagekapitals, der jährlich für Verzinsung und Amortisation abzuschreiben bezw. zu zahlen ist, q den Zinsfuss in Prozenten, der im ersten Falle für die Anleihe zu vergüten ist, bezw. zu dem im zweiten Falle die jährlichen Abschreibungen nutzbar angelegt werden können, n die Anzahl der Jahre, in denen das Kapital amortisiert werden soll bezw. die Konzessionsdauer, K das Anlage- und Betriebskapital und k die Erneuerungskosten der Anlage abzüglich des Material-Altwertes, also $K - k$ den Altwert der Anlage.

Der Zinsfuss q wird für die Fälle 1 und 2 verschieden anzunehmen sein, und zwar für den Fall 1 (Anleihe) nach den heutigen Verhältnissen etwa zu 0·045, für den Fall 2 (nutzbare Anlage der Abschreibungen) zu 0·035.

Die für Verzinsung und Amortisation zu berechnenden Quoten, Gleichung (21), hängen von der Wahl von n, der Anzahl der Jahre, ab. Bei ausschliesslicher Berücksichtigung der Erneuerung infolge Verschleisses ist es klar, dass für die einzelnen Teile der Anlage n verschieden gewählt werden muss, weil die Haltbarkeit derselben nicht die gleiche ist. Ist also die voraussichtliche Dauer der Benutzung kürzer als die Konzessionsdauer, so muss die erstere für n in die Rechnung eingeführt werden, da ja nach dieser Zeit voraussichtlich die betreffenden Maschinen und dergleichen ersetzt werden müssen. Ist dagegen die Dauer der Haltbarkeit grösser als die Konzessionsdauer, so wird die letztere einzuführen sein unter gebührender Berücksichtigung des nach dieser Zeit sich ergebenden Altwertes der Anlage. Der Erneuerungsfond ist also bei der Verzinsung und Amortisation bereits berücksichtigt und kommt daher für die Rechnungen des entwerfenden Ingenieurs nicht mehr in Frage.

In den Amortisationsfond werden gewöhnlich auch die für Instandhaltung der Anlage nötigen Quoten eingeschlossen. Auch diese sind naturgemäss für die verschiedenen Teile der Anlage verschieden und Erfahrungswerte, die von Fall zu Fall je nach Güte und Art der Maschinen variieren. Mittelwerte, und zwar getrennt für Amortisations- und Instandhaltungsquoten, sind in der folgenden Tabelle V zusammengestellt. Die letzte Säule enthält Angaben der reinen Abschreibungsquoten (ohne Verzinsung), die häufig von bestehenden Elektrizitätswerken für die einzelnen Teile der Anlage in Ansatz gebracht werden.[1])

Tabelle V.

Amortisations- und Instandhaltungsquoten für die einzelnen Teile elektrischer Anlagen.

	Amortisationsdauer bei natürlichem Verschleiss Jahre	Erneuerungskosten mit Berücksichtigung des Altwertes k/K	Quote für Amortisation und Verzinsung 100 p für $q = 0{\cdot}045$	$q = 0{\cdot}035$	Jährliche Instandhaltungskosten in % der Anschaffungskosten	Abschreibungssätze bestehender Werke in % der Anschaffungskosten
Gebäude, Schornstein, Fundamente	100	0·90	4·55	3·60	0·5	2·0
Dampfkessel	12	0·90	10·32	9·67	1·5	5·0
Vorwärmer und Reservoire	20	0·70	6·73	5·98	1·5	4·0
Pumpen	30	0·80	5·81	5·05	2·0	5·0
Rohrleitung nebst Zubehör	30	0·90	5·98	5·25	1·0	5·0
Dampfmaschinen	20	0·80	7·05	6·33	1·5	5·0
Transmissionen	30	0·80	5·81	5·05	1·0	—
Riemen und Seile	4	0·85	24·3	23·7	2·0	—
Turbinen	30	0·80	5·81	5·05	1·5	5·0
Dynamomaschinen, Elektromotoren	25	0·70	6·07	5·30	1·5	5·0
Akkumulatoren (ohne Zubehör)	12	0·80	9·67	8·98	2·0	10·0
Mess- und Schaltapparate	10	0·90	11·82	11·17	2·0	2·5
Transformatoren	30	0·70	5·65	4·86	1·5	5·0
Kabelnetze, armiert, in den Boden verlegt	30	0·70	5·65	4·86	0·2	5·0
Luftleitungsnetze, blank, auf Stangen verlegt	10	0·50	8·57	7·76	0·8	3·3
Eiserne Maste	25	0·90	6·55	5·90	1·0	—
Hölzerne Maste	10	0·90	11·80	11·10	1·5	—
Rest der Bausumme	—	—	7·0	6·0	—	4·0

Für p_l wäre also bei unterirdisch verlegten Kabelnetzen der Wert 0·05 bis 0·06, bei oberirdischen Leitungsnetzen 0·085 bis 0·095 einzusetzen. p_0 ergiebt sich als Mittelwert der Amortisationsquoten der einzelnen Teile der Betriebsanlage, d. h. als Quotient der Summe der Amortisationsbeträge durch die Gesamtkosten der Betriebsanlage einschliesslich Grunderwerb und Bauten.

1) S. Fritz Hoppe, Was lehren die Statistiken . . .

Als Mittelwerte können bei Überschlagsrechnungen **für p_0 benutzt werden** 0·07 bis 0·09 für Turbinenanlagen, 0·08 bis 0·10 **für Dampfanlagen und** 0·11 bis 0·12 für Akkumulatoren.

30. **Grenzwerte von z_L, z_B und j_w.**

Für die Leitungszahl z_L und die Betriebszahl z_B ergeben **sich nun** die Grenzen, wenn die niedrigsten und höchsten Werte der **einzelnen Grössen** in die Gleichungen

$$z_L = \sqrt{p_l \frac{b}{\varrho}} \text{ und } z_B = \sqrt{p_0 \alpha + T\beta}$$

eingesetzt werden. Wir erhalten dann für $\varrho = 0{\cdot}018$ bei einem Grundpreis des Kupfers von 40 bis 70 £ für

$$\left.\begin{array}{l} b = 0{\cdot}011,\quad p_l = 0{\cdot}085 : z_L\,(\text{Min.}) = 0{\cdot}228 \\ b = 0{\cdot}017,\quad p_l = 0{\cdot}095 : z_L\,(\text{Max.}) = 0{\cdot}300 \end{array}\right\}\text{ für Luftleitungen.}$$

$$\left.\begin{array}{l} b = 0{\cdot}021,\quad p_l = 0{\cdot}05\;\;\, : z_L\,(\text{Min.}) = 0{\cdot}242 \\ b = 0{\cdot}027,\quad p_l = 0{\cdot}06\;\;\, : z_L\,(\text{Max.}) = 0{\cdot}300 \end{array}\right\}\text{ für unterirdische Leitungsnetze.}$$

$$\left.\begin{array}{l} b = 0{\cdot}0385,\; p_l = 0{\cdot}05\;\;\, : z_L\,(\text{Min.}) = 0{\cdot}328 \\ b = 0{\cdot}0445,\; p_l = 0{\cdot}06\;\;\, : z_L\,(\text{Max.}) = 0{\cdot}386 \end{array}\right\}\begin{array}{l}\text{für verseilte Hochspannungs-} \\ \text{Zweileiterkabel (10000 Volt).}\end{array}$$

Ferner wird für Dampfbetrieb, wenn als Grenzen für T die Werte 250 und 3000 (letztere für rein industrielle Betriebe mit vollbelastetem zehnstündigen Arbeitstage) angenommen werden:

$$\alpha = 0{\cdot}9,\; \beta = 100 \cdot 10^{-6},\; T = 250,\;\; p_0 = 0{\cdot}08 : z_B\,(\text{Min.}) = 0{\cdot}31$$

$$\alpha = 1{\cdot}7,\; \beta = 200 \cdot 10^{-6},\; T = 3000,\; p_0 = 0{\cdot}10 : z_B\,(\text{Max.}) = 0{\cdot}88.$$

Die wirtschaftliche Stromdichte

$$j_w = \frac{z_L}{z_B}$$

kann demnach bei Centralen mit Dampfbetrieb in normalen Fällen zwischen 0·26 und 1·25 Amp./mm² schwanken.

Beispiel.

Wir wollen nun zu unserem Beispiel auf S. 9 zurückkehren, da es sich dort um einen einfachen Fall handelt, in dem sich die Verhältnisse leicht überblicken lassen.

Gegeben war die sekundäre Nutzenergie $\mathfrak{E} = 20 \cdot 100 = 2000$ Watt und die primäre Spannung $E_0 = 625$ Volt; ferner war $2\,l = 3000$ m. Zu bestimmen ist also diejenige Nutzspannung, für welche der Energieverlust und der Leitungsquerschnitt das wirtschaftliche Mass annehmen.

Es ist also:

$$\mathfrak{E}_0 = 2000 + \mathfrak{e}$$

$$J = \frac{2000 + \mathfrak{e}}{625}.$$

Wenn die volle Beleuchtung ganznächtlich ohne Rücksicht auf Mondschein stattfindet, so wird $\frac{i}{J} = 1$ und $T = \mathfrak{T} = 3650.$[1]) Wir nehmen Dampfbetrieb an und setzen voraus, dass die Zuleitung als Luftleitung auf Stangen ausgeführt werden soll. Es wird also für einen Kupfergrundpreis

---

1) Tafeln für die Beleuchtungsdauer von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang bezw. bis zu bestimmten Stunden finden sich im Kalender von UPPENBORN.

von 50 £ ($a = 0{\cdot}23$), $b = 0{\cdot}013$. Ferner sei $\alpha = 1{\cdot}2$, $\beta = 200 \cdot 10^{-6}$, also 0·20 Mk. für 1 KWStd, $p_l = 0{\cdot}09$ und $p_0 = 0{\cdot}10$, dann wird

$$z_L = \sqrt{\frac{0{\cdot}09 \cdot 0{\cdot}013}{0{\cdot}018}} = 0{\cdot}254$$

$$z_B = \sqrt{0{\cdot}10 \cdot 1{\cdot}2 + 3650 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0{\cdot}922$$

und nach den Gleichungen (13) bis (16) unter Berücksichtigung des oben entwickelten Wertes von J:

$$j_w = \frac{0{\cdot}254}{0{\cdot}922} = 0{\cdot}29$$

$$\mathfrak{e}_w = 3000 \cdot 0{\cdot}018 \cdot 0{\cdot}29 \cdot \frac{2000 + \mathfrak{e}_w}{625}$$

$$\mathfrak{e}_w = 51{\cdot}3$$

$$J = \frac{2051}{625} = 3{\cdot}28$$

$$2\,\varepsilon_w = \frac{51{\cdot}3}{3{\cdot}28} = 15{\cdot}6$$

$$E = 625 - 16 = 609$$

$$q_w = \frac{3{\cdot}28}{0{\cdot}29} = 11{\cdot}3 \text{ mm}^2.$$

Die Lampen müssten also für eine Spannung von 30·5 Volt gebaut sein und würden einen Strom von 3·28 Amp. verbrauchen. Da aber 11·3 mm² kein gebräuchlicher Querschnitt ist, so wählen wir den nächstliegenden Normalquerschnitt 10 mm², der zugleich auch gemäss den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker den Festigkeitsbedingungen für Freileitungen genügt. Der diesem Querschnitt entsprechende Widerstand der Leitung berechnet sich zu $2\,w = 5{\cdot}25\ \Omega$ und die neue Stromstärke folgt aus der Gleichung:

$$\mathfrak{E} + \mathfrak{e} = \mathfrak{E}_0$$

oder

$$2000 + 5{\cdot}25\ J^2 = 625 \cdot J$$

zu $J = 3{\cdot}29$ Amp. Die oben berechneten Ergebnisse bleiben also im wesentlichen bestehen.

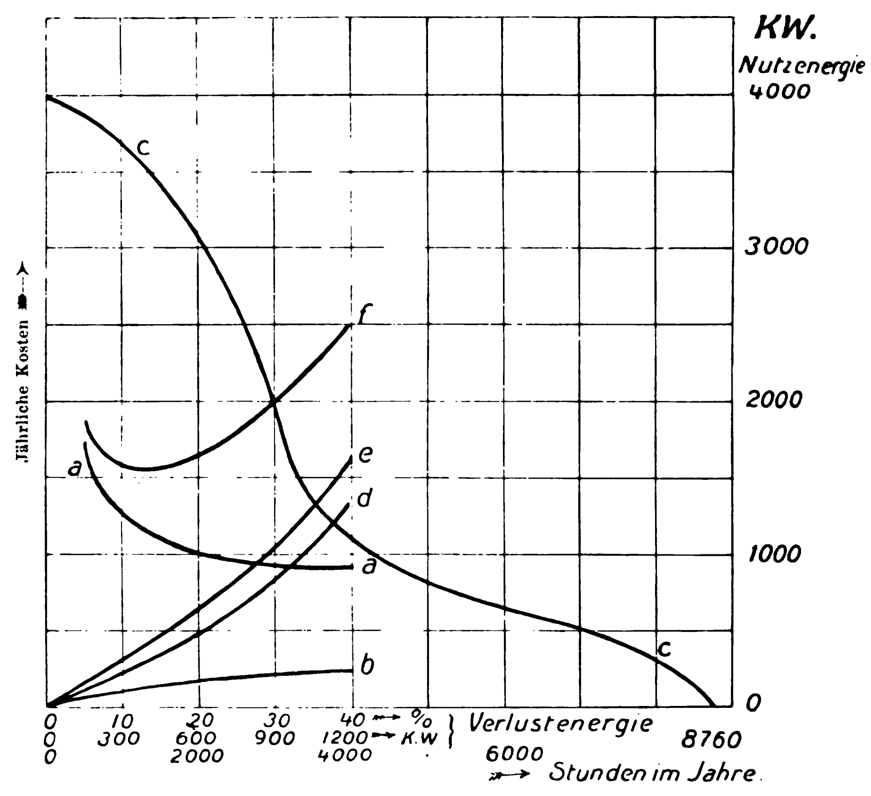
31. Graphische Ermittelung der wirtschaftlichen Grössen.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die graphische Darstellung der jährlichen Kosten der einzelnen Teile einer Anlage abhängig vom Leitungsverlust und die nachfolgende Summierung derselben ebenfalls zu einer Ermittlung des wirtschaftlichen Leitungsverlustes führt. Diese Methode, die von G. Semenza[1]) ausgebildet ist, bietet neben ihrer Anschaulichkeit noch den Vorteil, dass sie auch darüber unmittelbar Aufschluss giebt, ob eine durch irgend welche Gründe bedingte Abweichung von dem wirtschaftlichen Energieverlust eine wesentliche Verteuerung bezw. Verschlechterung der Anlage zur Folge hat und ob die Abweichung nach der einen oder andern Seite hin günstiger ist. Hierüber sagen unsere Formeln für die wirtschaftlichen Grössen nichts aus. Semenza giebt in der erwähnten Abhandlung eine

1) Vgl. Fussnote 2 auf S. 15.

Reihe von Beispielen, die die verschiedenen Fälle der Energieverteilung behandeln. Hier sei zur Kennzeichnung dieser Methode die folgende interessante Aufgabe wiedergegeben:

Es sollen an einem Orte 4000 KW installiert werden, und zwar steht in einer gewissen Entfernung eine Wasserkraft zur Verfügung, die jedoch nur eine Leistung von 3000 KW bietet. Der Rest, also 1000 KW + Energieverlust in der Leitung, soll durch eine Dampfanlage, die natürlich am Orte der Verwendung aufzustellen ist, beschafft werden. Es ist der günstigste Leitungsverlust zu bestimmen.



Kurve *a*: Jährliche Kosten der Leitungsanlage.
„ *b*: Jährliche Kosten der Zusatz-Dampfanlage.
„ *c*: Jährliche Beanspruchung der Centrale.
„ *d*: Jährliche Kohlenkosten.
„ *e*: Gesamte jährliche Dampfkosten.
„ *f*: Gesamte jährliche Stromfortleitungskosten.

Fig. 16.

Die jährlichen Kosten der Anlage setzen sich zusammen aus den für die Amortisation der Kosten der Turbinenanlage, der Dampfanlage und der Leitungen aufzuwendenden Beträgen und den Kosten für Betrieb und Verwaltung. Da für die Ermittlung des wirtschaftlichen Energieverlustes nur die Kosten für denjenigen Teil der Dampfanlage in Frage kommen, der die Leistung von 1000 KW übersteigt, so können wir bei der Zeichnung der Kurven von vornherein die Kosten für die Turbine und für 1000 KW der Dampfanlage übergehen und brauchen nur die jährlichen Kosten für die Leitungs- und die überschüssige Dampfanlage — nennen wir sie kurz Zu-

satz-Dampfanlage — in Abhängigkeit vom Verlust zu berücksichtigen. Die jährlichen Kosten für die Leitungsanlage steigen mit abnehmendem Verluste und werden für den Verlust „Null" unendlich; sie stellen sich also als Kurve *a* (Fig. 16) dar, die die Ordinatenachse zur Asymptote hat, wenn wir die Verluste als Abscissen auftragen. Umgekehrt werden die Kosten für die Zusatz-Dampfanlage, Kurve *b*, Null für den Verlust Null und steigen mit dem letzteren. Die jährlichen Betriebskosten ferner bestehen aus den Kosten für die Verwaltung und denen für Kohlen, Schmiermaterial u. s. w. Die ersteren, die indirekten Betriebskosten, können für die Zusatzanlage vernachlässigt werden, da man annehmen kann, dass durch sie besondere Aufwendungen nicht entstehen. Zur Ermittelung der letzteren, der direkten Betriebskosten, benötigen wir der Kurve der jährlichen Beanspruchung der Centrale, da ja die Dampfanlage nur dann in Betrieb genommen wird, wenn der Energieverbrauch die Leistung der Wasserkraft übersteigt. Es sei *c* diese Kurve, die vom Maximum, 4000 KW, bis auf etwa Null als Minimum abfällt. Sie ist so zu verstehen, dass während 1000 Stunden im Mittel etwa 3850, während weiterer 1000 Stunden 3400 KW u. s. w. nutzbar verbraucht werden, und zeigt, dass die Belastung auf mehr als 3000 KW, d. h. unter Berücksichtigung des Verlustes auf mehr als ungefähr 2500 KW Nutzleistung nur während etwa 2500 Stunden im Jahre steigt, dass also während der übrigen 6260 Stunden die Wasserkraft allein den Betrieb versorgen kann. Die Kohlenkosten für diese Zeit, abhängig von den Verlusten, werden nun durch die Kurve *d*, die gesamten Dampfkosten also durch die Kurve *e*, der Summe von *b* und *d* dargestellt. Kurve *f*, die Summe von *a* und *e*, ergiebt schliesslich die gesamten jährlichen Stromfortleitungskosten; sie besitzt ihr Minimum bei einem Verlust von ungefähr 12 % oder 360 KW, so dass also die Dampfanlage für rund 1350 KW berechnet werden muss, um den günstigsten Betrieb zu erzielen.

Die Parallelschaltung.

Wie wir gesehen haben, lässt sich die Bedingung der Elastizität bei Reihenschaltung nicht verwirklichen, und in der That hat dieser Mangel die allgemeine Einführung der elektrischen Licht- und Energieübertragung lange Zeit aufgehalten, bis die Parallelschaltungssysteme es ermöglichten, die Nutzwiderstände im weitesten Masse voneinander unabhängig zu machen, die Elastizität einer Anlage in jeder gewünschten Ausdehnung zu erreichen.

32. Reine Parallelschaltung von Widerständen.

Bei der Parallel- oder Nebeneinanderschaltung von Widerständen (Fig. 17) werden alle entsprechenden Klemmen derselben miteinander und mit denen der Stromquelle verbunden, so dass also alle Widerstände die gleiche Spannung besitzen, während ihre Stromstärke verschieden sein kann, im Gegensatz zur Hintereinanderschaltung, bei der in allen Stromempfängern die Stromstärke gleich, die Spannung dagegen verschieden war. Bei gegebener Spannung E und bekannten Widerständen w_ν ergiebt sich daher die Stromstärke in jedem Widerstande nach dem Ohm schen Gesetz zu

$$i_\nu = \frac{E}{w_\nu}$$

Fig. 17.

und daher die Gesamtstromstärke zu

$$J = \Sigma i_\nu = \Sigma \frac{E}{w_\nu} = \frac{E}{W}$$

oder wenn wir statt der Widerstände die Leitfähigkeiten einführen,

$$J = \Sigma E g_\nu = E G$$

wo W und G den Gesamtwiderstand bezw. die Gesamtleitfähigkeit bezeichnen. Also der Gesamtwiderstand und die Gesamtleitfähigkeit n parallel geschalteter Widerstände ist

$$\frac{1}{W} = \sum_1^n \frac{1}{w_\nu} = G \quad \ldots \ldots \ldots \quad (22)$$

$$G = \sum_1^n g_\nu \quad \ldots \ldots \ldots \quad (23)$$

In Worten: Bei parallel geschalteten Widerständen addieren sich die Leitfähigkeiten und der Gesamtwiderstand ist gleich dem reziproken Wert der Gesamtleitfähigkeit.

Ferner ist:

$$i_1 : i_2 : \cdots : i_n = g_1 : g_2 : \cdots : g_n$$

also

$$i_\nu = \frac{g_\nu}{G} J = \frac{W}{w_\nu} J \quad \ldots \ldots \ldots \quad (24)$$

Im besonderen wird der resultierende Widerstand für zwei parallel geschaltete Widerstände

$$W = \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2}; \quad \ldots \ldots \ldots \quad (25)$$

die Ströme in ihnen sind:

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \frac{g_1}{g_1 + g_2} J = \frac{w_2}{w_1 + w_2} J \\ i_2 &= \frac{g_2}{g_1 + g_2} J = \frac{w_1}{w_1 + w_2} J \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (26)$$

Für n gleiche Widerstände w in Parallelschaltung wird

$$W = \frac{w}{n} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (27)$$

$$i = \frac{J}{n} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (28)$$

33. **Gemischte Schaltung.** Bei der vorangehenden Entwickelung ist der Widerstand der die einzelnen Nutzwiderstände verbindenden Schienen als unendlich klein angenommen und daher nicht berücksichtigt worden. Ist dies nicht angängig, ist also der Widerstand der Zuleitungen gegenüber dem der parallel geschalteten Widerstände nicht zu vernachlässigen (Fig. 18), oder sind abwechselnd Widerstände und Gruppen hintereinander geschalteter Widerstände parallel geschaltet (Fig. 19), oder Widerstände oder Gruppen von parallel geschalteten Widerständen mit anderen derartigen Gruppen in Reihe geschaltet (Fig. 20), so entsteht die gemischte Schaltung.

Auch die gewöhnliche Anordnung räumlich verteilter Lampen oder sonstiger Nutzwiderstände in Parallelschaltung ist eine gemischte Schaltung,

da ja der Widerstand w der die Nutzwiderstände r verbindenden Leitungen stets einen angebbaren endlichen Wert besitzt. Fasst man den Begriff der gemischten Schaltung in diese strenge Definition, so ist leicht ersichtlich, dass reine Parallelschaltungsanlagen in der Praxis überhaupt nicht vorkommen, sondern nur gemischte Schaltungen. Man bezeichnet jedoch im weiteren Sinne als Parallelschaltungsanlagen alle diejenigen, in denen die Nutzwiderstände überwiegend einzeln zwischen die die Spannung führenden Leitungen geschaltet sind.

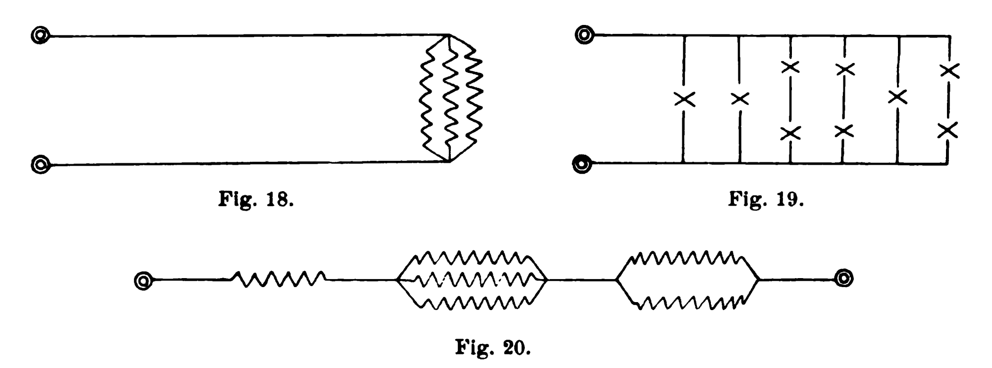


Fig. 18. Fig. 19.

Fig. 20.

34. Die Elastizität bei Parallelschaltung und der maximale Spannungsverlust.

Da die Löschbarkeit eines grösseren oder kleineren Teils der Lampen unumgängliche Bedingung für jede Lichtanlage bildet, so steht bei der Berechnung von Leitungen die Forderung der Elastizität [5, 6] an erster Stelle. Die Spannungsschwankung darf also, konstante Maschinenspannung vorausgesetzt, bei Verminderung der Lampenzahl vom Maximum bis zum Minimum 3 % der Nutzspannung nicht überschreiten, wobei angenommen wird, dass nicht alle Lampen zugleich aus- oder eingeschaltet werden können, was ja durch Anordnung von Schaltern für entsprechend kleine Lampengruppen stets erreicht werden kann. Es soll also, falls E_0 die Betriebs-, E die Nutzspannung bedeutet, $E_0 - E \leq 0{\cdot}03\,E$ sein, wobei wir statt $0{\cdot}03\,E$ auch ohne wesentlichen Fehler $0{\cdot}03\,E_0$ schreiben können. Nun ist aber $E_0 - E$ der Spannungsverlust 2ε in der Leitung; mit dieser Bedingung ist also bei elastischen Netzen, wie sie im folgenden stets vorausgesetzt werden, die obere Grenze für den zulässigen Spannungsverlust auf 3 % der Nutzspannung festgelegt, und wir dürfen diese Grenze selbst dann nicht überschreiten, wenn andere Rücksichten, wie die auf den wirtschaftlichen Betrieb, einen grösseren Verlust fordern würden. Vorausgesetzt ist hierbei allerdings, dass diese Spannungsverlustgrenze nicht, wie bei der Serienschaltung [11], auf unmögliche Ergebnisse in bezug auf den Wirkungsgrad führt. Dass dies nicht der Fall ist, lehrt die Aufstellung der Gleichung für diese Grösse. Der Wirkungsgrad der Leitung ist nach [12] Gleichung (5a)

$$\eta = \frac{E}{E_0} = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0}.$$

Die Grenzen für ε sind bei voller Belastung $\varepsilon = \frac{1}{2}(E_0 - E) = \mathcal{E}_0 - \mathcal{E} = 0{\cdot}03\,\mathcal{E}$ und bei unbelasteter oder sehr schwach belasteter Leitung $\varepsilon = o$. Daher sind bei voller Elastizität die Grenzen für η die sehr günstigen Werte 0·97 und 1·0 im Gegensatz zur Reihenschaltung, wo unter den gleichen Verhältnissen η zwischen 0·03 und 0 liegt.

Mit der Bestimmung des maximalen Spannungsverlustes im Verhältnis zur Nutzspannung ist zugleich die absolute Grösse des ersteren festgelegt, da die Höhe der Nutzspannung für Beleuchtungsnetze durch diejenige Spannung gegeben ist, für welche Glühlampen hergestellt werden können. Die Grenze derselben liegt heute bei etwa 220 bis 250 Volt, doch haben sich frühzeitig, durch die Massenproduktion der Glühlampen bedingt, Normen für die Spannungen ausgebildet, die bei dem Bau der Netze auch heute noch eingehalten werden. Da früher Glühlampen von genügender Brenndauer für nicht mehr als 110 bis 120 Volt gebaut werden konnten, so wurde die Spannung von 110 Volt (in Dreileiternetzen 2×110 Volt) lange Zeit ausschliesslich als Nutzspannung verwandt, da sie zugleich für den Betrieb von Bogenlampen günstig war, die damals an ihren Klemmen etwa 45 Volt und zur Vermeidung grösserer Stromschwankungen einen Vorschaltwiderstand brauchten, der etwa 20 Volt verzehrte; sie konnten daher bei 110 Volt zu zweien hintereinander in den Stromkreis geschaltet werden. Als es später gelang, auch Glühlampen für 150 und 220 Volt zu bauen, entstanden Centralen auch für diese Spannungen, da ja bei höherem Spannungsverlust die Leitungen billiger werden, und zwar bildeten 220 Volt die am meisten angewandte zweite Norm, ohne dass jedoch deshalb die erste aufgegeben wurde, weil Glühlampen für 220 Volt denen für 110 Volt im spezifischen Energieverbrauch sowohl wie in der Lebensdauer nachstehen, und weil es ferner als Nachteil empfunden wurde, dass man stets vier Bogenlampen zugleich brennen musste, wollte man nicht den Energieverlust für die an dieser Zahl fehlenden in Kauf nehmen.

35. Berechnung der Stromverteilung. Da die Stromstärke in den einzelnen Nutzwiderständen proportional zur Spannung ist, die an den Klemmen derselben herrscht, diese Spannung aber selbst wieder von der Stromstärke in der Leitung abhängt, insofern der Spannungsverlust proportional zum Strom ist, den die Leitung führt, so ist die genaue Stromverteilung selbst in einer einfachen Leitung mit parallel geschalteten Nutzwiderständen nur durch umständliche Rechnung zu gewinnen. Sehr einfach gestaltet sich jedoch die Bestimmung der Stromverteilung dann, wenn wir annehmen dürfen, dass an allen Punkten der Leitung die gleiche Spannung, nämlich die normale Nutzspannung herrscht. In diesem Falle können wir anstatt der Nutzwiderstände $2r$ unmittelbar die Stromstärken der Verbrauchsapparate $\frac{\varepsilon}{r}$ einsetzen und erhalten so bei offenen Leitungen unmittelbar die Stromverteilung durch Summierung der Abzweigströme. Diese Annahme kann aber nach dem Vorhergehenden bei elastischen Parallelschaltungsnetzen näherungsweise stets gemacht werden, da der Spannungsverlust in ihnen gegenüber der Nutzspannung vernachlässigt werden kann.

Den Einfluss des Fehlers, den wir bei diesem Näherungsverfahren in der Bestimmung der Stromstärke und damit in der Berechnung der Leitungsquerschnitte begehen, lehrt die folgende Überlegung: Hat die dem Anschlusspunkte zunächst liegende Lampe die normale Spannung und damit auch den normalen Strom, so erhält die letzte, entfernteste Lampe eine um höchstens $3\,^0/_0$ niedrigere Spannung und einen um ebensoviel geringeren Strom, während die zwischen beiden liegenden Lampen einen Strom verbrauchen, der weniger als $3\,^0/_0$ unterhalb des normalen Wertes liegt. Umgekehrt liegen die Verhältnisse, wenn die letzte Lampe normale Spannung, die erste also eine um

den Spannungsabfall zu hohe Spannung erhält. Der bei der Stromberechnung begangene Fehler wird aber stets weniger als $3\,^0/_0$ betragen und gleiches gilt für den auf Grund dieser Stromstärke berechneten Leitungsquerschnitt. Noch weiter kann der Fehler herabgedrückt werden, wenn man die Spannung am Anfang je nach der Belastung bis $1{\cdot}5\,^0/_0$ über der normalen Nutzspannung hält, so dass also die ersten Lampen um $1{\cdot}5\,^0/_0$ zu viel, die letzten um ebensoviel zu wenig Strom erhalten. Ein so geringer Fehler kann aber ohne weiteres vernachlässigt werden, da ja einerseits die Unsicherheiten in den Annahmen der zu projektierenden Anlagen gewöhnlich bedeutend grösser sind, andererseits die Leitungsquerschnitte auf die gangbaren Stärken abgerundet werden müssen.

36. Bezeichnungen.

Die Hin- und Rückleitung von gleichem Querschnitt wird durch eine einfache Linie (Fig. 21) dargestellt, die mit fortlaufenden Zahlen versehenen Abzweigungen durch senkrechte Striche, denen die Abzweigströme (oder auch Lampen) i_n angefügt werden. Die Leitungsströme werden durch grosse Buchstaben mit Hinzufügung der Zahlen der Abzweigungen, zwischen denen sie fliessen, also mit $J_{\nu-1,\,\nu}$, die Längen zwischen den Abzweigungen durch

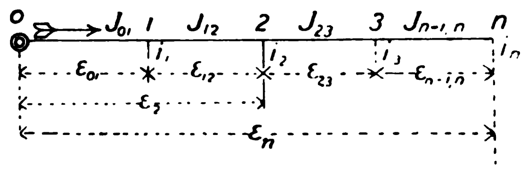


Fig. 21.

$l_{\mu\nu}$, die Spannungsverluste durch $\varepsilon_{\mu\nu}$ u. s. w. bezeichnet, wobei die Ziffer 0 auch fortgelassen werden kann, so dass z. B. l_ν gleich $l_{0\nu}$ wird. Zugleich bedeutet $J_{\mu\nu}$ den (positiven) Strom in der Richtung von μ nach ν, $\varepsilon_{\mu\nu}$ den Spannungsabfall von μ nach ν, so dass also

$$\varepsilon_{\mu\nu} = \mathcal{E}_\mu - \mathcal{E}_\nu = -\,\varepsilon_{\nu\mu};\quad J_{\mu\nu} = -\,J_{\nu\mu}.$$

Unter der Länge (l), dem Widerstande (w), der „Spannung gegen Null“ ($\mathcal{E}$) und dem Spannungsverlust (ε) sind stets die entsprechenden Grössen der einfachen in Betracht gezogenen Leitung verstanden, also die Länge der Hin- oder Rückleitung allein (gleich der auf dem Plan gemessenen Länge) u. s. w.

37. Spannungsverteilung.

Es ist, wie Fig. 21 unmittelbar zeigt:

$$l_\nu = \sum_1^\nu l_{\nu-1,\nu}$$

$$w_\nu = \sum_1^\nu w_{\nu-1,\nu}$$

$$\varepsilon_\nu = \sum_1^\nu \varepsilon_{\nu-1,\nu}$$

$$J_{\nu-1,\nu} = \sum_\nu^n i_\nu$$

Ferner ist nach dem OHMschen Gesetz:

$$\varepsilon_{\nu-1,\nu} = J_{\nu-1,\nu}\, w_{\nu-1,\nu} = J_{\nu-1,\nu}\, \frac{l_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}} \cdot \varrho,$$

daher folgt:

$$\varepsilon_\nu = \varrho \sum_1^\nu J_{\nu-1,\nu} \cdot \frac{l_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}} \quad \ldots\ldots \quad \text{(IIa)}$$

und für den maximalen Spannungsverlust:

$$\varepsilon_n = \varepsilon = \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, w_{\nu-1,\nu} = \varrho \cdot \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, \frac{l_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}} \quad \ldots \quad \text{(II)}$$

Diese beiden Gleichungen sind die Grundformeln für die Berechnung der Spannungsverteilung. Ersetzt man in der letzten Gleichung J durch die Abzweigströme i, so erhält man:

$$\begin{aligned}\varepsilon = i_1 w_{01} + i_2 w_{01} + \cdots &+ i_\nu w_{01} + \cdots + i_n w_{01}\\ + i_2 w_{12} + \cdots &+ i_\nu w_{12} + \cdots + i_n w_{12}\\ &+ \ldots\ldots\ldots\ldots\\ &+ i_\nu w_{\nu-1,\nu} + \cdots + i_n w_{\nu-1,\nu}\\ &+ \ldots\ldots\\ &+ i_n w_{n-1,n}\end{aligned}$$

oder:

$$\varepsilon = i_1 w_1 + i_2 w_2 + \cdots + i_\nu w_\nu + \cdots + i_n w_n$$

$$\varepsilon = \sum_1^n i_\nu w_\nu \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(III)}$$

Ebenso lässt sich Gleichung (IIa) in der Form schreiben:

$$\varepsilon_\nu = \sum_1^\nu i_\nu w_\nu \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(IIIa)}$$

Man bezeichnet das Produkt $i_\nu w_\nu$ in Anlehnung an die Drehmomente der Mechanik als Strommoment und kann dann Gleichung (III) folgendermassen in Worten ausdrücken:

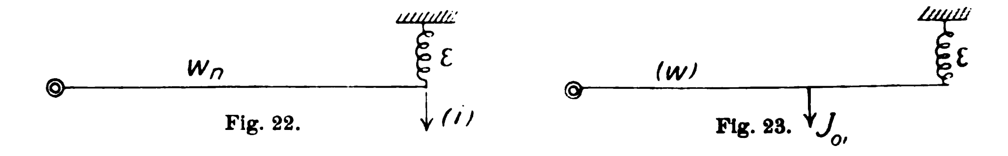


Fig. 22. Fig. 23.

D e r S p a n n u n g s v e r l u s t i s t g l e i c h d e r S u m m e d e r M o m e n t e d e r e i n z e l n e n A b z w e i g s t r ö m e.

Stellt man ε gleichfalls als Strommoment dar, indem man eine ideelle Stromstärke (i) einführt, die am Ende des Gesamtwiderstandes w_n abgezweigt wird (Fig. 22), oder indem man einen ideellen Widerstand (w) einführt, an dessen Ende der Gesamtstrom J_{01} wirkt (Fig. 23), also schreibt man:

$$\left.\begin{aligned} &\sum_1^n i_\nu \, w_\nu = (i) \, w_n \\ &\sum_1^n J_{\nu-1,\nu} \, w_{\nu-1,\nu} = J_{01} \, (w) \\ &\varepsilon = (i) \, w_n = J_{01} \, (w) \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (29)$$

so erhält man den Satz:

Der maximale Spannungsverlust ist dasjenige Moment, das der Summe der Strommomente das Gleichgewicht hält.[1]

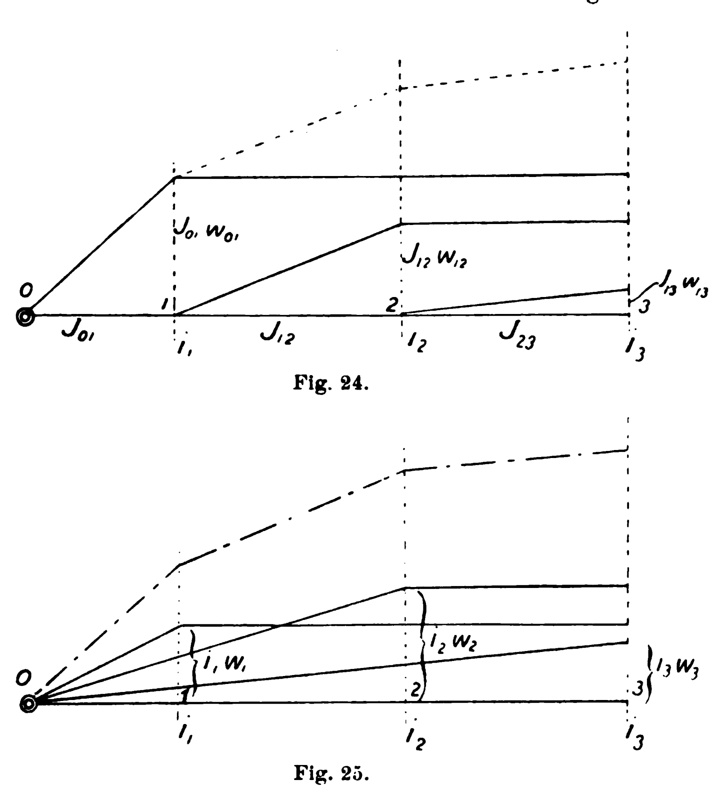


Fig. 24.

Fig. 25.

Da ferner das Strommoment $i_\nu \, w_\nu$ derjenige Spannungsverlust ist, den der Strom i_ν in dem zu ihm gehörigen Gesamtwiderstande w_ν erzeugen würde, wenn er allein abgezweigt wäre, so können wir die Gleichung (III) auch folgendermassen aussprechen:

Der Gesamtspannungsverlust einer Leitung entsteht durch Superposition[2] **der Spannungsverluste der einzelnen Abzweigströme.**

Aus Gleichung (II) und (III) ergeben sich zwei einfache graphische Darstellungen des Spannungsverlustes in einer Leitung:

---

1) TEICHMÜLLER, Elektrische Leitungen.

2) Das Superpositionsgesetz der Wirkungen ist auf die Probleme der elektrischen Leitungsberechnung zuerst von J. TEICHMÜLLER (a. a. O.) in ausgedehnter und methodischer Weise in Anwendung gebracht worden.

Die Produkte $J_{\nu-1,\nu}\, w_{\nu-1,\nu}$ (Fig. 24) und $i_\nu\, w_\nu$ (Fig. 25) werden in entsprechendem Massstabe als Ordinaten an den betreffenden Abzweigstellen aufgetragen und ihre Endpunkte mit den Anfangspunkten der die w darstellenden Strecken verbunden. Jeder Strom bringt also seinen Spannungsverlust unabhängig von den andern Strömen hervor, und zwar steigt die ihn darstellende geneigte Gerade von Null bis zum Maximum auf, um dann bis ans Ende der Linie als Parallele zur Abscissenachse zu verlaufen. Die Einzelwirkungen summieren sich zum wahren Spannungsverlust und geben die strichpunktierte gebrochene Linie.

Sind also die Querschnitte bezw. die Teilwiderstände einer Leitung bekannt, so kann die Kontrolle des Spannungsverlustes ε nach den Gleichungen (IIa) bis (IIIa) bewerkstelligt werden. Anders dagegen, wenn bei gegebenem ε_n die Querschnitte der Leitung bestimmt werden sollen. Da die n Querschnitte verschieden sein können, so wären in der Gleichung (II) n Unbekannte vorhanden; es müssten also noch weitere $n - 1$ Gleichungen aufgestellt werden, die entweder die Bedingungen für das Verhältnis der Querschnitte zu einander oder das der Teilspannungsverluste $\varepsilon_{\nu-1,\nu}$ zu einander oder zum Gesamtspannungsverlust ε ausdrücken müssten. Eine willkürliche Wahl dieser Verhältnisse ist natürlich ausgeschlossen; es müssen vielmehr Gründe dafür massgebend gemacht werden, die sich aus dem Wesen der Leitungsberechnung ergeben, d. h. es müssen diejenigen Verhältnisse gewählt werden, die uns, sei es in ökonomischer, sei es in praktischer Hinsicht die günstigsten Querschnitte geben.

38. Querschnittsberechnung auf Grund des geringsten Kupfergewichtes.

In ökonomischer Beziehung wird diejenige Leitung am günstigsten sein, die für den gegebenen maximalen Spannungsverlust ε das geringste Kupfergewicht bezw. Kupfervolumen besitzt. Dieses Kupfervolumen wird natürlich nicht das absolut günstigste Mass darstellen, das durch die Berechnung nach den in den Abschnitten [15] ff. gegebenen Gesichtspunkten erhalten werden könnte, da hiernach ja erst der günstigste Spannungsverlust ε_w zu bestimmen wäre, der im allgemeinen von unserm ε verschieden ausfallen würde. Da wir aber aus andern zwingenden Gründen [34] bereits über den maximalen Spannungsverlust verfügt haben, so wird das zu berechnende Minimum nur ein relatives sein können.

Das Volumen der Leitung ist durch $2\sum_1^n l_{\nu-1,\nu}\, q_{\nu-1,\nu}$ bestimmt, wir erhalten also zu Gleichung (II) die weitere Bedingung:

$$V = 2\sum_1^n l_{\nu-1,\nu}\, q_{\nu-1,\nu} = \text{Min.}$$

oder

$$\frac{\partial V}{\partial q_{\nu-1,\nu}} = 0 \ (\nu = 1, 2 \cdots n) \quad \ldots \ldots \quad (30)$$

Aus diesen $n + 1$ Gleichungen würden wir durch Elimination eines q n voneinander unabhängige Gleichungen erhalten, die uns die gewünschten Lösungen ergeben würden.

Die Variable q ist nun zur Aufstellung der fehlenden $n - 1$ Gleichungen ungünstig, da der durch Elimination eines Querschnittes, z. B. $q_{n-1,n}$ sich ergebende Ausdruck recht kompliziert und daher zur Differentiation ungeeignet ist. Einfacher wird die Gestalt der Gleichungen, wenn wir anstatt der Teil-

querschnitte die Teilspannungsverluste als unabhängige Veränderliche einführen. Da

$$q_{\nu-1,\nu} = \frac{J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}}{\varepsilon_{\nu-1,\nu}}\,\varrho$$

ist, so erhalten wir aus Gleichung (30):

$$V = 2\varrho \sum_{1}^{n} \frac{l^2_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu}}{\varepsilon_{\nu-1,\nu}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (31)$$

Ferner ist

$$\varepsilon_{n-1,n} = \varepsilon - \sum_{1}^{n-1} \varepsilon_{\nu-1,\nu},$$

also wird

$$\frac{V}{2\varrho} = \frac{J_{01}\, l^2_{01}}{\varepsilon_{01}} + \frac{J_{12}\, l^2_{12}}{\varepsilon_{12}} + \cdots + \frac{J_{n-2,n-1}\, l^2_{n-2,n-1}}{\varepsilon_{n-2,n-1}} + \frac{J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\varepsilon - \sum_{1}^{n-1} \varepsilon_{\nu-1,\nu}}$$

und durch partielle Differentiation nach $\varepsilon_{\nu-1,\nu}$ $(\nu = 1, 2 \cdots n-1)$:

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{01}} = -\frac{J_{01}\, l^2_{01}}{\varepsilon^2_{01}} + \frac{J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\left(\varepsilon - \sum_{1}^{n-1} \varepsilon_{\nu-1,\nu}\right)^2} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{12}} = -\frac{J_{12}\, l^2_{12}}{\varepsilon^2_{12}} + \frac{J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\left(\varepsilon - \sum_{1}^{n-1} \varepsilon_{\nu-1,\nu}\right)^2} = 0 \quad \ldots\ldots \quad (32)$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{n-2,n-1}} = -\frac{J_{n-2,n-1}\, l^2_{n-2,n-1}}{\varepsilon^2_{n-2,n-1}} + \frac{J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\left(\varepsilon - \sum_{1}^{n-1} \varepsilon_{\nu-1,\nu}\right)^2} = 0.$$

Hieraus ergeben sich weiterhin die $n-1$ Gleichungen:

$$\frac{J_{01}\, l^2_{01}}{\varepsilon^2_{01}} = \frac{J_{12}\, l^2_{12}}{\varepsilon^2_{12}} = \cdots = \frac{J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\varepsilon^2_{n-1,n}} \quad \ldots\ldots \quad (33)$$

und da

$$\frac{J^2_{\nu-1,\nu}\, l^2_{\nu-1,\nu}}{\varepsilon^2_{\nu-1,\nu}}\,\varrho^2 = q^2_{\nu-1,\nu}$$

oder

$$\frac{J_{\nu-1,\nu}\, l^2_{\nu-1,\nu}}{\varepsilon^2_{\nu-1,\nu}} = \frac{q^2_{\nu-1,\nu}}{J_{\nu-1,\nu}} \cdot \frac{1}{\varrho^2},$$

so folgt:

$$\frac{q^2_{01}}{J_{01}} = \frac{q^2_{12}}{J_{12}} = \cdots\cdots = \frac{q^2_{n-1,n}}{J_{n-1,n}} = \text{Konst.}$$

d. h.

$$q_{\nu-1,\nu} = K \cdot \sqrt{J_{\nu-1,\nu}} \quad (\nu = 1, 2 \cdots n) \quad \ldots\ldots \quad (34)$$

In Worten: **Soll bei bekannter Stromverteilung und gegebener Belastung eine Leitung für einen bestimmten maximalen Spannungsverlust die geringste Kupfermenge besitzen, so müssen die Querschnitte der einzelnen Strecken zwischen**

den Abzweigungen proportional der Quadratwurzel aus der sie durchfliessenden Stromstärke gewählt werden.

Die Gleichungen (II) und (34) bilden also ein System von $n+1$ unabhängigen Gleichungen für K und die n Querschnitte, die das Minimum an Leitungskupfer für das gewählte ε ergeben. Die Proportionalitätskonstante K eliminieren wir nun auf folgende Weise: Nach Gleichung (II) ist

$$\varepsilon = \varrho\left(\frac{J_{01}\,l_{01}}{q_{01}} + \frac{J_{12}\,l_{12}}{q_{12}} + \cdots + \frac{J_{\nu-1,\nu}\,l_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}} + \cdots + \frac{J_{n-1,n}\,l_{n-1,n}}{q_{n-1,n}}\right)$$

oder, wenn wir alle Querschnitte $q_{01}, q_{12}\cdots$ durch $q_{\nu-1,\nu}$ ausdrücken, indem wir nach Gleichung (34) $\frac{1}{q_{\mu-1,\mu}} = \frac{\sqrt{J_{\nu-1,\nu}}}{\sqrt{J_{\mu-1,\mu}}}\cdot\frac{1}{q_{\nu-1,\nu}}$ setzen:

$$\varepsilon = \varrho\,\frac{\sqrt{J_{\nu-1,\nu}}}{q_{\nu-1,\nu}}\left(\sqrt{J_{01}}\,l_{01} + \sqrt{J_{12}}\,l_{12} + \cdots + \sqrt{J_{\nu-1,\nu}}\cdot l_{\nu-1,\nu} + \cdots\right.$$

$$\left. + \sqrt{J_{n-1,n}}\,l_{n-1,n}\right)$$

$$= \varrho\,\frac{\sqrt{J_{\nu-1,\nu}}}{q_{\nu-1,\nu}}\sum_1^n l_{\nu-1,\nu}\sqrt{J_{\nu-1,\nu}}$$

woraus

$$K = \frac{q_{\nu-1,\nu}}{\sqrt{J_{\nu-1,\nu}}} = \frac{\varrho}{\varepsilon}\sum_1^n l_{\nu-1,\nu}\sqrt{J_{\nu-1,\nu}} \quad \ldots\ldots \quad (35)$$

folgt. Die endgültigen n Gleichungen für die n Querschnitte lauten also:

$$q_{\nu-1,\nu} = \left(\frac{\varrho}{\varepsilon}\sum_1^n l_{\nu-1,\nu}\sqrt{J_{\nu-1,\nu}}\right)\cdot\sqrt{J_{\nu-1,\nu}}\ (\nu = 1, 2\cdots n) \quad . \quad (IV)$$

Das Kupferminimum selbst ergiebt sich schliesslich zu

$$V_{min} = 2\sum_1 q_{\nu-1,\nu}\,l_{\nu-1,\nu} = \frac{2\varrho}{\varepsilon}\left(\sum_1^n l_{\nu-1,\nu}\sqrt{J_{\nu-1,\nu}}\right)^2 \quad . \ . \quad (V)$$

Es bleibt nun noch zu zeigen, dass die mit Hilfe der Gleichungen (IV) berechneten Querschnitte ein Minimum des Kupfervolumens ergeben, nicht etwa ein Maximum. Das erstere ist nach den Regeln der höheren Analysis der Fall, wenn die folgenden Ungleichungen[1]) erfüllt sind:

$$\Delta_1 \equiv \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon^2_{01}} > 0.$$

$$\Delta_2 \equiv \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon^2_{01}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01}\,\partial \varepsilon_{12}} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12}\,\partial \varepsilon_{01}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon^2_{12}} \end{vmatrix} > 0.$$

. . . .

1) S. SCHLÖMILCH, Handbuch der Mathematik II, S. 509.

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon^2_{01}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01}\, \partial \varepsilon_{12}} & \cdots & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01}\, \partial \varepsilon_{n-1,n}} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12}\, \partial \varepsilon_{01}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon^2_{12}} & \cdots & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12}\, \partial \varepsilon_{n-1,n}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{n-1,n}\, \partial \varepsilon_{01}} & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{n-1,n}\, \partial \varepsilon_{12}} & \cdots & \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon^2_{n-1,n}} \end{vmatrix} > 0.$$

Es genügt, wenn wir an den ersten zwei Ungleichungen deren Gültigkeit nachweisen, da für die übrigen der Nachweis in ganz ähnlicher Weise durch Zurückführung der Determinanten höherer in solche niederer Ordnung geführt werden kann.

Aus den Gleichungen (32):

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{01}} = -\frac{J_{01}\, l^2_{01}}{\varepsilon^2_{01}} + \frac{J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{(\varepsilon - \sum_1^{n-1} \varepsilon_{\nu-1,\nu})^2} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{12}} = -\frac{J_{12}\, l^2_{12}}{\varepsilon^2_{12}} + \frac{J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{(\varepsilon - \sum_1^{n-1} \varepsilon_{\nu-1,\nu})^2} = 0$$

ergiebt sich:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon^2_{01}} = \frac{2 J_{01}\, l^2_{01}}{\varepsilon^3_{01}} + \frac{2 J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{(\varepsilon - \sum_1^{n-1} \varepsilon_{\nu-1,\nu})^3} = \frac{2 J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\varepsilon^2_{n-1,n}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\right),$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon^2_{12}} = \frac{2 J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\varepsilon^2_{n-1,n}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\right),$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{01}\, \partial \varepsilon_{12}} = \frac{\partial^2 V}{\partial \varepsilon_{12}\, \partial \varepsilon_{01}} = \frac{2 J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\varepsilon^3_{n-1,n}}.$$

Da nun sämtliche in

$$\Delta_1 = \frac{2 J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\varepsilon^2_{n-1,n}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\right)$$

vorkommenden Grössen wesentlich positiv sind, so folgt ohne weiteres

$$\Delta_1 > 0.$$

Ferner wird auch

$$\Delta_2 = \left(\frac{2 J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\varepsilon^2_{n-1,n}}\right)^2 \left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\right)\left(\frac{1}{\varepsilon_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\right) \cdot$$

$$- \left(\frac{2 J_{n-1,n}\, l^2_{n-1,n}}{\varepsilon^2_{n-1,n}}\right)^2 \frac{1}{\varepsilon^2_{n-1,n}} > 0,$$

da ja

$$\left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\right)\left(\frac{1}{\varepsilon_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\right) - \left(\frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\right)^2 = \frac{1}{\varepsilon_{01}\,\varepsilon_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_{n-1,n}}\left(\frac{1}{\varepsilon_{01}} + \frac{1}{\varepsilon_{12}}\right)$$

ebenfalls aus lauter positiven Grössen besteht. —

Wir haben bisher die Hin- und Rückleitung unseres Leitungsstranges von gleichem Querschnitt angenommen. Es fragt sich, ob diese Annahme die günstigste Anordnung ist, oder ob ein anderes Verhältnis der Querschnitte eine geringere Kupfermenge ergeben würde.

Bezeichnen wir den Querschnitt der Hinleitung mit q_h, den der Rückleitung mit q_r und entsprechend die Spannungsverluste in ihnen mit ε_h und ε_r, so ist zunächst

$$\varepsilon_h + \varepsilon_r = 2\,\varepsilon.$$

Das Kupfervolumen ist

$$V = l\,(q_h + q_r) = J l^2 \varrho \left(\frac{1}{\varepsilon_h} + \frac{1}{\varepsilon_r}\right) = J l^2 \varrho \left(\frac{1}{\varepsilon_h} + \frac{1}{2\varepsilon - \varepsilon_h}\right).$$

Hieraus erhalten wir weiter:

$$\frac{dV}{d\varepsilon_h} = -\frac{1}{\varepsilon_h^2} + \frac{1}{(2\varepsilon - \varepsilon_h)^2} = 0$$

oder

$$\varepsilon_h = \varepsilon_r = \varepsilon,$$

d. h.

$$q_h = q_r.$$

Das Minimum der Kupfermenge wird erhalten, wenn die Hin- und Rückleitung einer Linie von gleichem Querschnitt sind.

Fig. 26.

Beispiel. Es sei eine Leitung nach Fig. 26 auf geringste Kupfermenge zu berechnen, wenn die Nutzspannung 120 Volt beträgt und ein maximaler Verlust von 2 % zugelassen wird.

Wir haben also

$$2\,\varepsilon = 2{\cdot}4;\quad J_{01} = \sum_1^4 i_\nu = 75;\quad J_{12} = \sum_2^4 i_\nu = 55;\quad J_{23} = \sum_3^4 i_\nu = 50;$$

$$J_{34} = i_4 = 10.$$

Ferner

$$\varrho = 0{\cdot}018 \text{ (Kupferleitung)}.$$

Demnach wird nach Gleichung (35):

$$K = \frac{\varrho}{\varepsilon} \sum_1^4 l_{\nu-1,\nu} \sqrt{J_{\nu-1,\nu}} = \frac{0{\cdot}018}{1{\cdot}2} \cdot 754 = 11{\cdot}3$$

und nach Gleichung (34):

$$q_{01} = 11{\cdot}3\,\sqrt{75} = 98 \text{ mm}^2 \quad \text{und} \quad \varepsilon_{01} = \frac{75 \cdot 25 \cdot 0{\cdot}018}{98} = 0{\cdot}345$$

$$q_{12} = 11{\cdot}3\,\sqrt{55} = 83 \quad „ \quad „ \quad \varepsilon_{12} = \frac{55 \cdot 25 \cdot 0{\cdot}018}{83} = 0{\cdot}297$$

$$q_{23} = 11{\cdot}3\,\sqrt{50} = 80 \quad „ \quad „ \quad \varepsilon_{23} = \frac{50 \cdot 5 \cdot 0{\cdot}018}{80} = 0{\cdot}056$$

$$q_{34} = 11{\cdot}3\,\sqrt{10} = 35{\cdot}8 \quad „ \quad „ \quad \varepsilon_{34} = \frac{10 \cdot 100 \cdot 0{\cdot}018}{35{\cdot}8} = 0{\cdot}502$$

$$\varepsilon = 1{\cdot}200.$$

Das aufgewendete Kupfervolumen beträgt

$$V_{min} = 2\,(25 \cdot 98 + 25 \cdot 83 + 5 \cdot 80 + 100 \cdot 35{\cdot}8) = 17000 \text{ cm}^3.$$

Dass die so erhaltenen Querschnitte auch der Feuersicherheit genügen, zeigt die Tabelle I, S. 6. Zugleich ersieht man aus ihr aber auch, dass von diesen Querschnitten keiner den fabrikationsmässig hergestellten Normalquerschnitten entspricht. Der erste und letzte Querschnitt können ohne weiteres durch die fast gleichen Normalquerschnitte 95 und 35, die beiden andern müssen durch die nächstliegenden Querschnitte 95 und 70 mm² ersetzt werden und es ergiebt sich dann:

$$\varepsilon = 1{\cdot}19; \quad V = 17200.$$

Also durch die Änderung der Querschnitte ist die Kupfermenge etwas grösser, der Spannungsverlust unwesentlich kleiner geworden.

Es zeigt sich also, dass im allgemeinen in der Praxis die genaue Ausführung der auf minimale Kupfermenge berechneten Leitungen nicht durchführbar ist, dass man sich dem günstigsten Fall nur nähern kann. Ein fernerer Übelstand, der zugleich das mit dem geringsten Kupfervolumen selbstverständlich erstrebte Kostenminimum illusorisch macht, ist der häufige Wechsel der Kabelquerschnitte, wodurch Lötungen und Verbindungsstücke notwendig werden, die die Leitungskosten natürlich erhöhen.

39. Querschnittsberechnung bei konstantem Querschnitt.

Diese Übelstände werden vermieden, wenn wir für die ganze Strecke den gleichen Querschnitt, also

$$q_{01} = q_{12} = \cdots = q_{n-1,n} = q$$

voraussetzen. Dies ergiebt die in praktischer Hinsicht günstigste Anordnung der Leitungen, bildet also die zweite der oben erwähnten Grundlagen für die Querschnittsberechnung.

Die Gleichung (II)

$$\varepsilon = \varrho \sum_1^n \frac{J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}}$$

vereinfacht sich dann zu

$$\varepsilon = \frac{\varrho}{q} \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}, \qquad \text{(VI)}$$

also wird

$$q = \frac{\varrho}{\varepsilon} \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu} \qquad \text{(VII)}$$

oder auch, da nach (II) und (III)

$$\sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, w_{\nu-1,\nu} = \sum_1^n i_\nu w_\nu, \quad \text{d. h.} \quad \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu} = \sum_1^n i_\nu l_\nu:$$

$$q = \frac{\varrho}{\varepsilon} \sum_1^n i_\nu l_\nu \qquad \text{(VIII)}$$

Beispiel.

Legen wir wieder die Daten unseres Beispiels auf S. 42 zu Grunde, so wird nach Gleichung (VII):

$$\sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu} = 75 \cdot 25 = 1875$$
$$+ 55 \cdot 25 = 1375$$
$$+ 50 \cdot 5 = 250$$
$$+ 10 \cdot 100 = 1000$$
$$\overline{4500}$$

und nach Gleichung (VIII):

$$\sum_1^n i_\nu\, l_\nu = 20 \cdot 25 = 500$$
$$+ 5 \cdot 50 = 250$$
$$+ 40 \cdot 55 = 2200$$
$$+ 10 \cdot 155 = 1550$$
$$\overline{4500}$$

Wir erhalten also:

$$q = \frac{0{\cdot}018}{1{\cdot}2} \cdot 4500 = 67{\cdot}5 \text{ mm}^2 \doteq 70 \text{ mm}^2,$$

einen Querschnitt, der der Feuersicherheit Genüge leistet. Das Kupfervolumen wird

$$V = 2 \cdot 67{\cdot}5 \cdot 155 = 20925 \text{ cm}^3 \text{ gegen } V_{min} = 17000 \text{ cm}^3,$$

bezw.

$$V = 2 \cdot 70{\cdot}0 \cdot 155 = 21700 \quad " \quad " \quad V_{min} = 17200 \quad "$$

also etwa 25 % grösser als dem günstigsten Falle entspricht.

40. Querschnittsberechnung bei konstanter Stromdichte. Giebt also die letzte Methode auch grössere Kupfermengen als die Berechnung auf die ökonomisch günstigsten Querschnitte, so wird man doch meist wegen der damit verbundenen Bequemlichkeit der Leitungsverlegung die Berechnung auf konstanten Querschnitt vorziehen und auch bei grösseren Netzen mit einigen wenigen Querschnitten auszukommen suchen, da ja, wie schon erwähnt, die Kosten des Netzes nicht allein von der Kupfermenge abhängen, sondern auch von den bei Querschnittsänderungen nötigen Verbindungsteilen, von den für die Lötstellen aufzuwendenden Arbeitslöhnen, vom Verschnitt u. s. w. Ferner ist eine feste und unveränderliche Belastung von Netzen, für die ja die Rechnung allein gilt, fast niemals gegeben, sie ändert sich vielmehr fortwährend; daher hat die Berechnung auf das Minimum des Leitungsmetalles nur einen relativen, vergleichenden Wert: man will sich nicht zu weit von dem günstigsten Kupferaufwande entfernen. Andererseits kann es leicht vorkommen, dass der berechnete konstante Querschnitt für die in dem ersten Teil der Strecke fliessende Gesamtstromstärke nicht die nötige Feuersicherheit bietet, so dass aus diesem Grunde, will man nicht den Querschnitt für die ganze Strecke verstärken, verschiedene Querschnitte verwendet werden müssen. Für den Fall, dass verschiedene Querschnitte erwünscht sind, giebt die Berechnung auf konstante Stromdichte eine brauchbare und bequeme Methode ab.

Ersetzt man nämlich in Gleichung (II)

$$\varepsilon = \varrho \sum_1^n \frac{J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}}$$

die Stromstärke durch die Stromdichte

$$j_{\nu-1,\nu} = \frac{J_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}},$$

so erhält man

$$\varepsilon = \varrho \sum_1^n j_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu} = \varrho\, j \sum_1^n l_{\nu-1,\nu},$$

falls $j_{\nu-1,\nu} = j$ als konstant angenommen wird. Nun ist $\sum_1^n l_{\nu-1,\nu} = l_n$ die Gesamtlänge des Kabels, also wird

$$j = \frac{\varepsilon}{\varrho\, l_n} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(IX)}$$

erhalten. Die Stromdichte ist also nur von dem zulässigen Spannungsverlust, der Kabellänge und dem spezifischen Widerstande des Leitungsmaterials, nicht aber von der Stromstärke und ihrer Verteilung abhängig. Ferner wird der Querschnitt eines jeden Leitungsstückes

$$q_{\nu-1,\nu} = \frac{J_{\nu-1,\nu}}{j} = \frac{\varrho}{\varepsilon} J_{\nu-1,\nu}\, l_n \quad \ldots\ldots \quad \text{(X)}$$

und der darin auftretende Spannungsverlust

$$\varepsilon_{\nu-1,\nu} = \varrho \frac{J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}} = \frac{l_{\nu-1,\nu}}{l_n} \varepsilon \quad \ldots\ldots \quad (36)$$

Also der Querschnitt $q_{\nu-1,\nu}$ hängt nicht von der Länge $l_{\nu-1,\nu}$ des vom Strome $J_{\nu-1,\nu}$ durchflossenen Leitungsstückes ab, sondern von der Gesamtlänge des Kabels. Er ist so zu berechnen, als wäre der Strom $J_{\nu-1,\nu}$ allein am Ende der Gesamtleitung abgezweigt und erzeugte auf seinem Wege den ganzen Spannungsverlust. Daher ist auch der Spannungsverlust in den einzelnen Teilstrecken proportional zur Länge $l_{\nu-1,\nu}$ derselben, so dass sich auch aus dieser Erkenntnis die Gleichung (36) ergeben würde.

Diese Berechnungsmethode ist äusserst einfach und bequem; auch die Prüfung auf Feuersicherheit ist zugleich mit der Querschnittsberechnung erledigt, da ja die ermittelte Stromdichte unmittelbar ein Mass für die erstere ist.

Wir wollen nun noch prüfen, wie sich die auf diesem Wege erhaltene Kupfermenge zu der nach der Methode des konstanten Querschnitts berechneten verhält. Nach der letzteren erhält man die aufzuwendende Kupfermenge unter Berücksichtigung der Gleichungen (VII) und (VIII) zu:

$$V_q = 2\, l_n\, q = 2 \frac{\varrho}{\varepsilon} l_n \sum_1^n i_\nu\, l_\nu = 2 \frac{\varrho}{\varepsilon} l_n \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}, \quad . \quad (37)$$

während bei konstanter Stromdichte sich durch Anwendung der Gleichung (X) ergiebt:

$$V_j = 2 \sum_1^n l_{\nu-1,\nu}\, q_{\nu-1,\nu} = \frac{2}{j} \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu} = 2 \frac{\varrho}{\varepsilon} l_n \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu} \quad (38)$$

Also es folgt:

$$V_j = V_q. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (39)$$

Die beiden Methoden der Querschnittsberechnung auf konstanten Querschnitt und konstante Stromdichte geben demnach die gleichen Kupfermengen, die aber nicht das geringste Kupfervolumen darstellen.

Beispiel. Nach S. 42 war: $\varepsilon = 1{\cdot}2$; $J_{01} = 75$; $J_{12} = 55$; $J_{23} = 50$; $J_{34} = 10$; $l_{01} = 25$; $l_{12} = 25$; $l_{23} = 5$; $l_{34} = 100$. Also wird nach Gleichung (IX) und (X):

$$j = \frac{\varepsilon}{\varrho\, l_n} = \frac{1{\cdot}2}{0{\cdot}018 \cdot 155} = 0{\cdot}430 \text{ Amp./mm}^2$$

$$q_{01} = \frac{75}{0{\cdot}430} = 174;\; q_{12} = 128;\; q_{23} = 116;\; q_{34} = 23{\cdot}2 \text{ mm}^2.$$

Bei dem auf S. 44 ermittelten, für die ganze Länge konstanten Querschnitt $67{\cdot}5$ mm² betrug dagegen die Stromdichte im ersten Teil des Kabels $1{\cdot}11$, im letzten nur $0{\cdot}148$ Amp./mm², d. h. $7{\cdot}5$ mal weniger.

41. Besondere Fälle der Stromverteilung. In der Praxis kommt öfter der Fall vor, dass, etwa wie bei dem Beispiel der öffentlichen Beleuchtung in Reihenschaltung auf S. 9, eine Leitung in gleichen Abständen durch die gleiche Stromabnahme, oder auch, dass sie im Grenzfalle ihrer ganzen Länge nach gleichförmig belastet ist, so dass sie also auf jedes Längenelement dl den gleichen Strom di abzugeben hat. Der letzte Fall gewinnt einmal Bedeutung bei der Isolationsberechnung von Kabeln,

Fig. 27.

wenn sie nämlich in ihrer ganzen Länge gleichmässig gut oder schlecht isoliert sind, ferner aber bei der Projektierung von Beleuchtungscentralen, wenn man mangels sicherer Angaben gezwungen ist, nach Massgabe ähnlicher Anlagen eine Belastung von i Amp. für 1 m Strassenfront anzunehmen. Wir wollen nun die Gleichungen für die Spannungsverteilung und Querschnittsberechnung bei einer derartigen Stromverteilung in Parallelschaltung ermitteln, wenn die Leitung konstanten Querschnitt besitzt.

Ist also eine Leitung von l m einfacher Länge auf je $\frac{l}{n}$ m mit einer Stromabnahme von i Amp. belastet (Fig. 27), und ist 2ε der maximal zulässige Spannungsverlust, so wird der zuzuführende Gesamtstrom

$$J = n\, i,$$

und die Teilströme in den Teilstrecken der Leitung sind:

$$J_{\nu-1,\nu} = [n - (\nu - 1)]\, i.$$

Daher wird nach Gleichung (VII):

$$q = \frac{\varrho}{\varepsilon} \sum_1^n J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu} = \frac{\varrho}{\varepsilon}\, \frac{l i}{n} \sum_1^n [n - (\nu - 1)]$$

oder entwickelt:

$$q = \frac{\varrho}{\varepsilon} \cdot \frac{l i}{n} [n + (n-1) + \cdots + (n - (\nu - 1)) + \cdots + 2 + 1]$$

$$= \frac{\varrho}{\varepsilon}\, \frac{l i}{n}\, \frac{n(n+1)}{2}$$

$$= \frac{n+1}{2n} \cdot \frac{\varrho}{\varepsilon} \cdot l J \quad \ldots \ldots \quad (40)$$

Umgekehrt würde bei bekanntem Querschnitt der Spannungsverlust am Ende der Leitung sein:

$$\varepsilon = \frac{n+1}{2n} \varrho \frac{lJ}{q} \quad \text{. . . . . (41)}$$

und der Spannungsverlust in irgend einem Abzweigpunkte ν:

$$\varepsilon_\nu = \frac{\varrho l i}{q n} [n + (n-1) + \cdots + (n - (\nu - 1))]$$

$$= \frac{\nu}{n}\left(1 - \frac{\nu - 1}{2n}\right) \varrho \frac{lJ}{q} \quad \text{. . . . . (42)}$$

Für $n = \infty$ erhalten wir den Grenzfall der gleichförmig belasteten Leitung, die für jedes Längenelement dl den Strom di abgiebt, so dass $\int_0^l di = \frac{J}{l}\int_0^l dl = J$ ist. Für diesen Fall wird:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \varrho \frac{lJ}{q}, \quad \text{. . . . . (XI)}$$

da

$$\left[\frac{n+1}{2n}\right]_{n=\infty} = \left[\frac{1 + \frac{1}{n}}{2}\right]_{n=\infty} = \frac{1}{2}$$

ist, und:

$$q = \frac{1}{2} \frac{\varrho}{\varepsilon} \cdot lJ \quad \text{. . . . . (XII)}$$

Das heisst also: Eine gleichförmig belastete Leitung mit der Gesamtstromentnahme J verhält sich genau wie eine mit der halben Stromstärke am Ende oder mit der Gesamtstromstärke in der Mitte

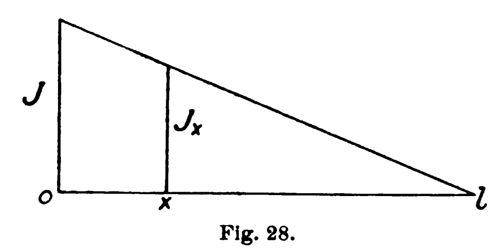


Fig. 28.

belastete Leitung. Wir haben uns demnach in dem oben erwähnten praktischen Falle, dass die Stromentnahme einer Leitung mit i Amp. für das laufende Meter gegeben ist, dieselbe in der Mitte mit $J = il$ Amp. belastet zu denken.

Wollen wir den Spannungsverlust in irgend einem Punkte der gleichförmig belasteten Leitung bestimmen, so gilt die folgende Überlegung: Der Leitungsstrom in der Entfernung x vom Anfangspunkt beträgt

$$J_x = J - \frac{J}{l} x = \frac{J}{l}(l - x) \text{ Amp.}$$

Die Belastung wird also durch eine Gerade (Fig. 28) dargestellt, die durch den Endpunkt der Leitung geht ($J_x = 0$ für $x = l$) und von der Ordinatenachse eine Strecke gleich J abschneidet ($J_x = J$ für $x = 0$). Der Spannungsverlust im Längenelement dx ist also:

$$d\varepsilon = \varrho \cdot \frac{J_x \, dx}{q}$$

und der Spannungsverlust bis zum Punkte x:

$$\varepsilon_x = \frac{\varrho}{q}\int_0^x J_x\,dx = \varrho\,\frac{J}{q\,l}\int_0^x (l-x)\,dx$$

$$\varepsilon_x = \varrho\,\frac{J x}{q\,l}\left(l - \frac{x}{2}\right). \quad \text{(XIa)}$$

Für $x = l$ erhalten wir wieder den maximalen Spannungsverlust wie in Gleichung (XI).

Die Gleichung (XIa) stellt eine Parabel dar, deren Scheitel über dem Endpunkte der Strecke $x = l$ liegt und daher zur Ordinate den Spannungsverlust $\varepsilon = \frac{1}{2}\,\varrho\,\frac{l J}{q}$ hat.

Dagegen erhalten wir für $n = 1$ aus den Gleichungen (40) und (41) den bereits bekannten Fall der nur mit einer Stromentnahme $i = J$ am Ende belasteten Strecke, für welche der maximale Spannungsverlust

$$\varepsilon_1 = \varrho\,\frac{l J}{q} = 2\,\varepsilon$$

wird. Ähnlich ergiebt sich für $n = 2, 4, 8 \cdots$

$$\varepsilon_2 = \frac{3}{4}\,\varrho\,\frac{l J}{q} = 1{\cdot}5\,\varepsilon$$

$$\varepsilon_4 = 1{\cdot}25\,\varepsilon$$

$$\varepsilon_8 = 1{\cdot}125\,\varepsilon$$

u. s. f. Diese Spannungsverlustkurven sind in Fig. 29 dargestellt. Da $\varepsilon_1 = 2\varepsilon$, so ist die Gerade $0\,\varepsilon_1$ Tangente der Parabel im Punkte 0. Die Spannungs-

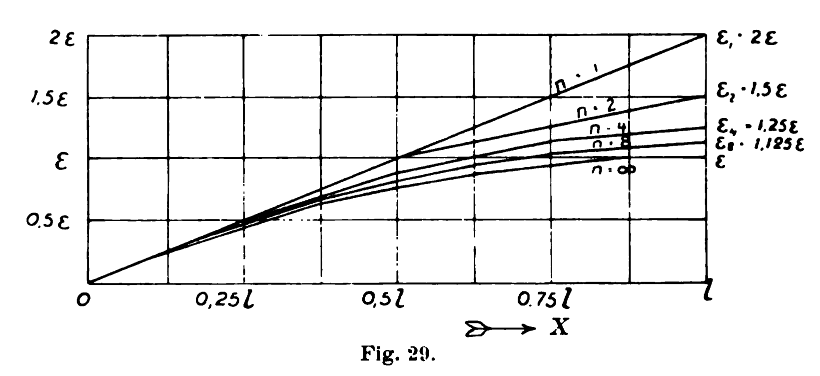


Fig. 29.

verlustkurven nähern sich mit wachsendem n der Parabel, und zwar kann man, wie ersichtlich, bereits für verhältnismässig kleine n die einfacheren Grenzformeln (XI), (XIa) und (XII) zur Rechnung verwenden, ohne wesentliche Fehler zu begehen.

Umgekehrt ist aus den Kurven der Fig. 29 zu ersehen, dass es statthaft ist, die Belastung einer Strecke mangels genauer Angaben für das laufende Meter anzunehmen. Im äussersten Falle, nämlich wenn die ganze Last am Ende der Leitung abgenommen wird, würde der Verlust doppelt soviel als angenommen betragen. Im allgemeinen wird dieser Fall jedoch nie eintreten, da Punkte mit grösserer Belastung (Theater u. s. f.) bekannt zu sein pflegen

und gesondert neben der gleichförmigen Belastung berücksichtigt werden. Die Verteilung für die letztere wird sich vielmehr stets so gestalten, dass eine grössere Zahl von Abzweigungen vorhanden ist, die die Voraussetzung einer gleichförmigen Belastung zu rechtfertigen geeignet ist.

42. Querschnittsberechnung bei verzweigten Leitungen.

Die bisher betrachteten offenen Leitungen stellten sich als einfache Strecken dar, von denen die räumlich verteilten Belastungen unmittelbar abgenommen wurden. Liegen diese Abzweigungen, wie in Fig. 30 angedeutet, zerstreut, so entsteht durch Verbindung derselben eine verzweigte Leitung, bei der man im allgemeinen je nach der Grösse der Belastungen Haupt- und Nebenzweige unterscheiden kann. Auch hier gilt die Hauptforderung, dass der Spannungsverlust an keinem Punkte der Leitung eine gegebene Grösse ε überschreiten darf, und man kann von vornherein sagen, dass die günstigste Ausnutzung des Kupfers erreicht werden wird, wenn bei voller Belastung der maximal zulässige Spannungsverlust an allen freien Enden erreicht wird. In diesem Falle kann man aber die zu jedem Verzweigungspunkt gehörigen,

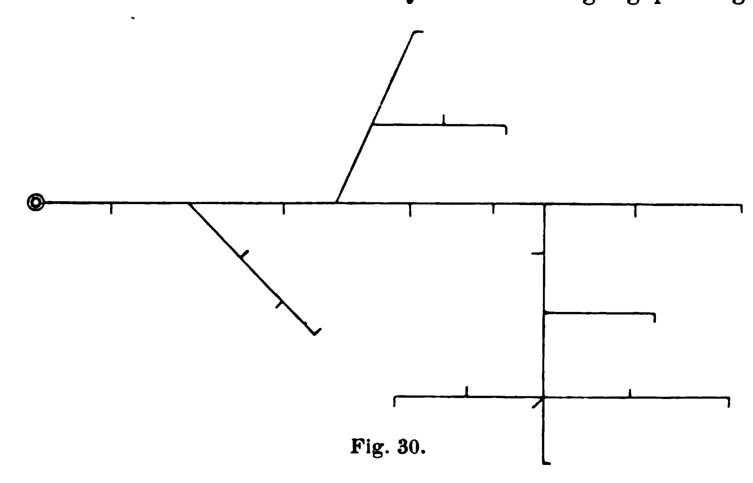


Fig. 30.

parallel geschalteten Leitungen durch eine solche von äquivalenter Leitfähigkeit ersetzen, deren Länge und Querschnitt allerdings vorerst noch unbestimmt sind, und gelangt so, von dem letzten Verzweigungspunkt rückwärts gehend, zu einem einfachen Leitungsstrang.

43. Geringstes Kupfergewicht bei verzweigten Leitungen.

Betrachten wir zunächst den einfachsten Fall, nämlich eine Leitung (Fig. 31), die sich in zwei Zweige gabelt. Die Leitungsströme J_{01}, J'_{12} und J''_{12} können ohne weiteres aus den Belastungen abgeleitet werden und es ist

$$\varepsilon = \varepsilon_{01} + \varepsilon_{12},$$

also wird:

$$q_{01} = \frac{J_{01}\, l_{01}}{\varepsilon_{01}}\,\varrho;\quad q'_{12} = \frac{J'_{12}\, l'_{12}}{\varepsilon - \varepsilon_{01}}\,\varrho;\quad q''_{12} = \frac{J''_{12}\, l''_{12}}{\varepsilon - \varepsilon_{01}}\,\varrho \quad . \quad . \quad (43)$$

Da diese drei Gleichungen vier Unbekannte enthalten, nämlich q_{01}, q'_{12}, q''_{12} und ε_{01}, so müssen wir, um die Lösungen eindeutig zu gestalten, noch eine vierte Gleichung hinzufügen, und hierzu werden wir, wie früher, zunächst natürlich die Bedingung des geringsten Kupfervolumens wählen. Wir erhalten also als vierte Gleichung:

$$\frac{1}{2}\,V = q_{01}\, l_{01} + q'_{12}\, l'_{12} + q''_{12}\, l''_{12} = \text{Min.}$$

oder indem wir die Querschnitte eliminieren:

$$\frac{V}{2\varrho} = \frac{J_{01}\, l^2_{01}}{\varepsilon_{01}} + \frac{J'_{12}\, l'^2_{12}}{\varepsilon - \varepsilon_{01}} + \frac{J''_{12}\, l''^2_{12}}{\varepsilon - \varepsilon_{01}} = \text{Min.} \quad . \quad . \quad . \quad (44)$$

Die Differentiation nach ε_{01} ergiebt als günstigstes Verhältnis der Teilspannungsverluste:

$$\frac{J_{01}\, l^2_{01}}{\varepsilon^2_{01}} = \frac{J'_{12}\, l'^2_{12} + J''_{12}\, l''^2_{12}}{\varepsilon^2_{12}}$$

oder:

$$\frac{\varepsilon_{01}}{\varepsilon_{12}} = \frac{l_{01}}{\sqrt{\frac{J'_{12}}{J_{01}} l'^2_{12} + \frac{J''_{12}}{J_{01}} l''^2_{12}}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (45\text{a})$$

Die Wurzelgrösse

$$\sqrt{\frac{J'_{12}}{J_{01}} l'^2_{12} + \frac{J''_{12}}{J_{01}} l''^2_{12}} = \lambda_{12} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (46\text{a})$$

stellt offenbar eine Länge dar; sie wird nach dem Vorgange von HERZOG-FELDMANN[1]) die „fiktive Länge der quadratischen Strommomente“ der beiden Zweigleitungen, kurz die „fiktive Länge“ der die beiden Zweigleitungen ersetzenden Strecke λ_{12} (Fig. 31) genannt, da sie diejenige Länge darstellt, in der der Gesamtstrom $J_{12} = J'_{12} + J''_{12} = J_{01}$ den Spannungsverlust ε_{12} hervorbringen würde, wie leicht ersichtlich ist, wenn wir Gleichung (45a) in der Form schreiben:

$$\frac{\varepsilon_{01}}{\varepsilon_{12}} = \frac{l_{01}\, J_{01}\, \varrho / q_{01}}{\lambda_{12}\, J_{12}\, \varrho / q_{01}}.$$

Der Querschnitt dieser fiktiven Leitung würde dann gleich demjenigen der unverzweigten Leitung q_{01} sein. Durch diese Annahmen sind also Länge und Querschnitt der die Einzelleitungen ersetzenden äquivalenten Leitfähigkeit für den Fall des geringsten Kupfervolumens festgelegt.

Setzen wir anstatt der zwei Zweigleitungen allgemeiner n solcher Leitungen voraus, so geht Gleichung (45a) in die folgende über:

$$\frac{\varepsilon_{01}}{\varepsilon_{12}} = \frac{l_{01}}{\sqrt{\frac{1}{J_{01}} \sum_1^n \left(l^{(\nu)}_{12} \sqrt{J^{(\nu)}_{12}}\right)^2}} = \frac{l_{01}}{\lambda_{12}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (45)$$

wo dann

$$\lambda_{12} = \sqrt{\frac{1}{J_{01}} \sum_1^n \left(l^{(\nu)}_{12} \sqrt{J^{(\nu)}_{12}}\right)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (46)$$

Die Querschnitte ergeben sich schliesslich mittels der Gleichungen (43).

Sind die Leitungen nicht bloss an den Enden belastet (Fig. 32), so berechnet man die einzelnen Teilquerschnitte nach Massgabe des Abschnittes [38], nachdem gemäss Gleichung (45) die Teilspannungen für den unverzweigten und verzweigten Teil der ganzen Strecke bestimmt sind. Zu diesem Zwecke müssen wir allerdings noch eine kleine Umformung der Gleichung (35) vornehmen, da die Gleichung (45) in den unverzweigten Leitungsteilen

1) Elektrische Leitungsnetze, 1. u. 2. Aufl.

nur eine die ganze Länge durchfliessende Stromstärke voraussetzt. Nach Gleichung (35) ist:

$$\varepsilon = \frac{\varrho}{K} \sum_{1}^{n} l_{\nu-1,\nu} \sqrt{J_{\nu-1,\nu}}$$

oder, wenn wir die rechte Seite mit der ganzen Länge l_n multiplizieren und dividieren:

$$\varepsilon = \frac{\varrho}{K} l_n \sum_{1}^{n} \frac{l_{\nu-1,\nu}}{l_n} \sqrt{J_{\nu-1,\nu}} = \frac{\varrho}{K} l_n \sqrt{J_n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

indem wir für die Summe der im Verhältnis $\frac{l_{\nu-1,\nu}}{l_n}$ reduzierten Wurzeln aus den Leitungsströmen $\sqrt{J_n}$ setzen. J_n ist dann diejenige Stromstärke, welche,

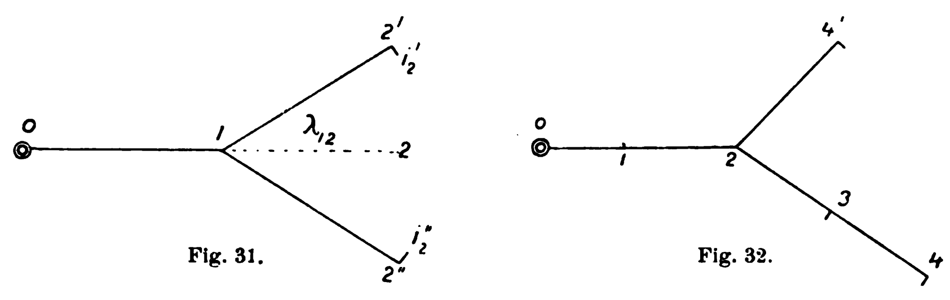


Fig. 31. Fig. 32.

die ganze Leitung durchfliessend, den gleichen Spannungsverlust ε hervorruft, der durch die thatsächliche Stromverteilung entsteht, da $K = \frac{q_n}{\sqrt{J_n}}$ in Gleichung (47) eingesetzt

$$\varepsilon = \varrho \frac{l J_n}{q_n}$$

ergiebt. Wir nennen daher in Anlehnung an die oben definierte „fiktive Länge" J_n die „fiktive Stromstärke" der Leitung, und es ist

$$\sqrt{J_n} = \frac{1}{l_n} \sum_{1}^{n} l_{\nu-1,\nu} \sqrt{J_{\nu-1,\nu}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

Demnach würde für Fig. 32 sein:

$$\sqrt{J_{02}} = \frac{1}{l_{02}} (l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}})$$

$$\sqrt{J_{24}} = \frac{1}{l_{24}} (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})$$

$$\lambda_{24} = \frac{1}{\sqrt{J_{02}}} \sqrt{(l_{24} \sqrt{J_{24}})^2 + (l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2}$$

$$= \frac{l_{02} \sqrt{(l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 + (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})^2}}{l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}}}$$

$$\varepsilon_{02} = \frac{l_{02}}{l_{02} + \lambda_{24}} \varepsilon$$

$$= \frac{l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}}}{l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}} + \sqrt{(l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 + (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})^2}} \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon_{24} = \frac{\lambda_{24}}{l_{02} + \lambda_{24}} \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_{02}$$

Daher ergeben sich nach Gleichung (IV) für die einzelnen Querschnitte die folgenden expliziten Ausdrücke:[1]

$$q_{01} = \frac{\varrho}{\varepsilon_{02}} (l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}}) \sqrt{J_{01}}$$

$$= \frac{\varrho}{\varepsilon} \sqrt{J_{01}} \left[l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}} + \sqrt{(l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 + (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})^2} \right]$$

$$q_{12} = \frac{\varrho}{\varepsilon_{02}} (l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}}) \sqrt{J_{12}}$$

$$= \frac{\varrho}{\varepsilon} \sqrt{J_{12}} \left[l_{01} \sqrt{J_{01}} + l_{12} \sqrt{J_{12}} + \sqrt{(l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2 + (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})^2} \right]$$

$$q'_{24} = \frac{\varrho}{\varepsilon_{24}} l'_{24} J'_{24} = \frac{\varrho}{\varepsilon_{24}} \sqrt{J'_{24}} (l'_{24} \sqrt{J'_{24}})^2$$

$$q_{23} = \frac{\varrho}{\varepsilon_{24}} \sqrt{J_{23}} (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}})$$

$$q_{34} = \frac{\varrho}{\varepsilon_{24}} \sqrt{J_{34}} (l_{23} \sqrt{J_{23}} + l_{34} \sqrt{J_{34}}).$$

44. Konstanter Querschnitt bei verzweigten Leitungen. Diese Rechnungen sind nun aber infolge des wiederholten Wurzelziehens und Quadrierens nicht gerade einfach, jedenfalls aber sehr zeitraubend. Die Notwendigkeit, die berechneten Querschnitte schliesslich auf die gangbaren Normalquerschnitte abzurunden, rechtfertigt also um so mehr die Einführung einer einfacheren Berechnungsmethode. Diese erhalten wir, wenn wir anstatt der Bedingung des geringsten Kupfervolumens diejenige des konstanten Querschnittes einführen, indem wir bestimmen, dass die Summe der Querschnitte der verzweigten Leitungen gleich dem Querschnitt der zugehörigen unverzweigten Strecke sei. Wir erhalten also zu dem Gleichungssystem (43)

$$q_{01} = \frac{J_{01}\, l_{01}}{\varepsilon_{01}} \varrho; \quad q'_{12} = \frac{J'_{12}\, l'_{12}}{\varepsilon - \varepsilon_{01}} \varrho; \quad q'_{12} = \frac{J''_{12}\, l''_{12}}{\varepsilon - \varepsilon_{01}} \varrho$$

als vierte das System eindeutig gestaltende Gleichung:

$$q'_{12} + q''_{12} = q_{12} = q_{01}$$

oder

$$\frac{\varepsilon_{01}}{\varepsilon_{12}} = \frac{l_{01}}{\frac{J'_{12}}{J_{01}} l'_{12} + \frac{J''_{12}}{J_{01}} l''_{12}} = \frac{l_{01}}{\lambda_{12}}$$

wo nunmehr λ die fiktive Länge der linearen Strommomente darstellt. Es wird also allgemein die fiktive Leitungslänge für n-Zweige:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{J_{01}} \sum_{1}^{n} J_{12}^{(\nu)}\, l_{12}^{(\nu)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (49)$$

und

$$\frac{\varepsilon_{01}}{\varepsilon_{12}} = \frac{l_{01}}{\lambda_{12}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (50)$$

1) Diese Gleichungen sind auf anderem Wege bereits von E. MÜLLENDORFF, ETZ 1892, S. 49 entwickelt worden.

Ferner wird die fiktive Stromstärke bei Stromverteilung nach Fig. 32:

$$J_n = \frac{1}{l_n} \sum_1^n l_{\nu-1,\nu} J_{\nu-1,\nu} \quad \ldots \ldots \quad (51)$$

45. Konstante Stromdichte bei verzweigten Leitungen.

Wollten wir schliesslich als vierte Gleichung für das System (43) an Stelle des konstanten Querschnittes die Bedingung der konstanten Stromdichte für alle Zweige einführen, so sehen wir sofort, dass dies nicht angängig ist, da diese Bedingung zu einem Widerspruch führt. Es wäre dann nämlich für Fig. 31

$$\varepsilon_{01} = \frac{l_{01} J_{01}}{q_{01}} \varrho = l_{01} j \varrho;\ \varepsilon_{12} = l'_{12} j \varrho = l''_{12} j \varrho,$$

d. h. es müsste $l'_{12} = l''_{12}$ sein, was allgemein nicht der Fall ist.

Dagegen ist eine etwas geänderte Form dieser Bedingung sehr geeignet, eine noch einfachere Methode für die Querschnittsbestimmung verzweigter Leitungen abzugeben. Denn es ist ja nicht zu leugnen, dass auch die letzte Berechnungsart, die des konstanten Querschnitts, infolge der Ermittelung der verschiedenen fiktiven Längen, immerhin noch reichlich viel Rechenaufwand bedingt, so dass man sie nur für wichtigere Fälle verwenden wird, vor allem dann, wenn die Zweigleitungen in bezug auf Belastung etwa äquivalent dem Hauptstrang sind, so dass man einen eigentlichen Hauptstrang nicht recht herauslösen kann. Tritt dagegen die Bedeutung der Nebenzweige gegenüber dem Hauptstrang wesentlich zurück, so berechnet man nur den Hauptstrang nach den im Abschnitt [40] gegebenen Regeln und bemisst den Querschnitt der Zweigleitungen unter Zugrundelegung des noch verfügbaren Spannungsverlustes. Als Kennzeichen für die Wichtigkeit der Zweigleitungen genügen, wie aus den vorhergehenden Entwickelungen deutlich erkennbar ist, natürlich nicht die Stromstärken allein, sondern die Strommomente $\Sigma J l$.

Wollten wir nun aber den Hauptstrang unter Voraussetzung konstanten Querschnitts berechnen, so würde einmal gerade bei verzweigten Leitungen leicht der Fall eintreten, dass für den ersten Teil, der den Gesamtstrom zu führen hat, der erhaltene Querschnitt nicht der Feuersicherheit genügt, während er im letzten Teil für seine Grösse sehr gering beansprucht ist; andererseits aber ist das Spannungsgefäll im Kabel, d. h. der Spannungsverlust für die Längeneinheit, bei konstantem Querschnitt

$$\frac{d\varepsilon}{dl} = \varrho \frac{\varepsilon_{\nu-1,\nu}}{l_{\nu-1,\nu}} = \varrho J_{\nu-1,\nu}$$

naturgemäss im Anfang viel bedeutender als am Ende, da ja im Anfang der Leitungsstrom viel grösser ist. Das bedingt aber, dass für diejenigen Zweigleitungen, die gegen das Ende der Hauptstrecke hin liegen, verhältnismässig viel weniger Spannungsverlust zur Verfügung bleibt, als für die früher abzweigenden, dass also die Querschnitte der Zweigleitungen gegen das Ende hin selbst bei geringerem Strom stärker werden als im Anfang (vgl. das folgende Beispiel).

Diese Nachteile werden vermieden bei Annahme konstanter Stromdichte, denn die Querschnitte sind proportional zum Strom, den sie führen, und das Spannungsgefäll ist

$$\frac{d\varepsilon}{dl} = \frac{\varepsilon_{\nu-1,\nu}}{l_{\nu-1,\nu}} = \varrho j = \text{Konst.},$$

der Spannungsverlust ist also proportional zur Länge unabhängig von dem Leitungsstrom.

Um nun bei einer Stromverteilung, wie in Fig. 32, nicht zu oft die Querschnitte zu wechseln, wird man für jede Strecke zwischen zwei Verzweigungspunkten den Querschnitt konstant halten, indem man den fiktiven Strom der Querschnittsermittelung nach Gleichung (X) zu Grunde legt.

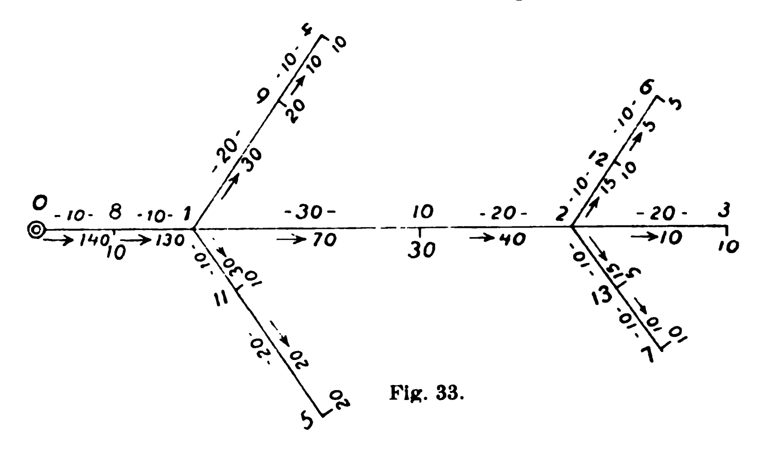


Fig. 33.

Beispiel.

Um einen Überblick über die verschiedenen Berechnungsarten und deren Ergebnisse zu erhalten, berechnen wir die Querschnitte einer Leitungsverzweigung nach Fig. 33, indem wir einen maximalen (einfachen) Spannungsverlust von $\varepsilon = 1$ Volt annehmen.

1. Geringstes Kupfervolumen.

Nach Gleichung (48) ist:

$$\sqrt{J_{01}} = \frac{1}{20}(10\sqrt{140} + 10\sqrt{130}) = 11{\cdot}62$$
$$\sqrt{J_{12}} = \frac{1}{50}(30\sqrt{70} + 20\sqrt{40}) = 7{\cdot}76$$
$$\sqrt{J_{14}} = \frac{1}{30}(20\sqrt{30} + 10\sqrt{10}) = 4{\cdot}70$$
$$\sqrt{J_{15}} = \frac{1}{30}(10\sqrt{30} + 20\sqrt{20}) = 4{\cdot}81$$
$$\sqrt{J_{26}} = \frac{1}{20}(10\sqrt{15} + 10\sqrt{5}) = 3{\cdot}05$$
$$\sqrt{J_{27}} = \frac{1}{20}(10\sqrt{15} + 10\sqrt{10}) = 3{\cdot}52$$

Nach Gleichung (46):

$$\lambda^2_{23} = \frac{1}{7{\cdot}76^2}\left[(20 \cdot 3{\cdot}05)^2 + (20\sqrt{10})^2 + (20 \cdot 3{\cdot}52)^2\right]$$
$$\lambda_{23} = 14{\cdot}6$$
$$l_{12} + \lambda_{23} = 50 + 14{\cdot}6 = 64{\cdot}6$$
$$\lambda^2_{12} = \frac{1}{11{\cdot}62^2}\left[(30 \cdot 4{\cdot}70)^2 + (64{\cdot}6 \cdot 7{\cdot}76)^2 + (30 \cdot 4{\cdot}81)^2\right]$$
$$\lambda_{12} = 46{\cdot}5$$
$$l_{01} + \lambda_{12} = 20 + 46{\cdot}5 = 66{\cdot}5.$$

Nach Gleichung (45):

$$\varepsilon_{01} = 1 \cdot \frac{20}{66\cdot5} = 0\cdot308$$

$$\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0\cdot692.$$

$$\varepsilon_{12} = 0\cdot692 \cdot \frac{50}{64\cdot6} = 0\cdot535$$

$$\varepsilon_{23} = 0\cdot692 - 0\cdot535 = 0\cdot157.$$

Nach Gleichung (IV):

$$q_{08} = \frac{0\cdot018}{0\cdot308}\,(10\sqrt{140} + 10\sqrt{130})\sqrt{140} = 13\cdot6\,\sqrt{140} = 160 \doteq 150$$

$$q_{81} = 13\cdot6\,\sqrt{130} = 155 \doteq 150$$

$$q_{19} = \frac{0\cdot018}{0\cdot692}\,(20\sqrt{30} + 10\sqrt{10})\sqrt{30} = 3\cdot66\,\sqrt{30} = 20\cdot0 \doteq 25$$

$$q_{94} = 3\cdot66\,\sqrt{10} = 11\cdot5 \doteq 10$$

$$q_{111} = \frac{0\cdot018}{0\cdot692}\,(10\sqrt{30} + 20\sqrt{20})\sqrt{30} = 3\cdot72\,\sqrt{30} = 20\cdot4 \doteq 25$$

$$q_{115} = 3\cdot72\,\sqrt{20} = 16\cdot7 \doteq 16$$

$$q_{110} = \frac{0\cdot018}{0\cdot535}\,(30\sqrt{70} + 20\sqrt{40})\sqrt{70} = 13\cdot1\,\sqrt{70} = 109 \doteq 120$$

$$q_{102} = 13\cdot1\,\sqrt{40} = 82\cdot9 \doteq 70$$

$$q_{212} = \frac{0\cdot018}{0\cdot157}\,(10\sqrt{15} + 10\sqrt{5})\sqrt{15} = 7\cdot01\,\sqrt{15} = 27\cdot2 \doteq 25$$

$$q_{126} = 7\cdot01\,\sqrt{5} = 15\cdot6 \doteq 16$$

$$q_{23} = \frac{0\cdot018}{0\cdot157} \cdot 20 \cdot 10 = 23\cdot0 \doteq 25$$

$$q_{213} = \frac{0\cdot018}{0\cdot157}\,(10\sqrt{15} + 10\sqrt{10})\sqrt{15} = 8\cdot08\,\sqrt{15} = 31\cdot3 \doteq 25$$

$$q_{137} = 8\cdot08\,\sqrt{10} = 25\cdot5 \doteq 25.$$

Für die hinter dem Annäherungszeichen stehenden fabrikationsmässigen Querschnitte würden sich die folgenden Spannungsverluste ergeben:

$$\varepsilon_{01} = 0\cdot324;\ \varepsilon_{12} = 0\cdot520;\ \varepsilon_{23} = 0\cdot144,$$

und die maximalen Verluste sind:

in Punkt 3: 0·988
" " 4: 0·935
" " 5: 0·990
" " 6: 1·008
" " 7: 1·024.

Der theoretisch erreichbare minimale Kupferaufwand bei Verlegung der berechneten Querschnitte würde sein:

$$V = \Sigma l q = 10370 \text{ cm}^3.$$

Der praktisch erreichbare minimale Kupferaufwand wird:

$$V' = 10620 \text{ cm}^3 = 1\cdot025\ V.$$

2. Konstanter Querschnitt.

Nach Gleichung (51) wird:

$$J_{01} = \frac{1}{20}(10 \cdot 140 + 10 \cdot 130) = 135$$

$$J_{12} = \frac{1}{50}(30 \cdot 70 + 20 \cdot 40) = 58$$

$$J_{14} = \frac{1}{30}(20 \cdot 30 + 10 \cdot 10) = 23{\cdot}3$$

$$J_{15} = \frac{1}{30}(10 \cdot 30 + 20 \cdot 20) = 23{\cdot}3$$

$$J_{26} = \frac{1}{20}(10 \cdot 15 + 10 \cdot \;\; 5) = 10$$

$$J_{27} = \frac{1}{20}(10 \cdot 15 + 10 \cdot 10) = 12{\cdot}5.$$

Nach Gleichung (49):

$$\lambda_{23} = \frac{1}{58}(10 \cdot 20 + 10 \cdot 20 + 12{\cdot}5 \cdot 20) = 11{\cdot}2$$

$$l_{12} + \lambda_{23} = 61{\cdot}2.$$

$$\lambda_{12} = \frac{1}{135}(23{\cdot}3 \cdot 30 + 58 \cdot 61{\cdot}2 + 23{\cdot}3 \cdot 30) = 36{\cdot}7$$

$$l_{01} + \lambda_{12} = 56{\cdot}7.$$

Nach Gleichung (50):

$$\varepsilon_{01} = 1 \cdot \frac{20}{56{\cdot}7} = 0{\cdot}353$$

$$\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0{\cdot}647$$

$$\varepsilon_{12} = 0{\cdot}647 \cdot \frac{50}{61{\cdot}2} = 0{\cdot}528$$

$$\varepsilon_{23} = 0{\cdot}647 - 0{\cdot}528 = 0{\cdot}119.$$

Daher:

$$q_{01} = \frac{0{\cdot}018 \cdot 135 \cdot 20}{0{\cdot}353} = 138 \doteq 150$$

$$q_{14} = q_{15} = \frac{0{\cdot}018 \cdot 23{\cdot}3 \cdot 30}{0{\cdot}647} = 19{\cdot}4 \doteq 25$$

$$q_{12} = \frac{0{\cdot}018 \cdot 58 \cdot 50}{0{\cdot}528} = 99{\cdot}0 \doteq 95$$

$$q_{23} = q_{26} = \frac{0{\cdot}018 \cdot 10 \cdot 20}{0{\cdot}119} = 30{\cdot}2 \doteq 35$$

$$q_{27} = \frac{0{\cdot}018 \cdot 12{\cdot}5 \cdot 20}{0{\cdot}119} = 37{\cdot}8 \doteq 35.$$

Es ist also bis auf kleine Fehler infolge der angestr[illegible] ge[illegible]keit der Rechnung

$$q_{01} = q_{12} + q_{14} + q_{15}; \; q_{12} = q \ldots \; q \ldots$$

Ferner ist für die praktischen Querschnitte:

$$\varepsilon_{01} = 0{\cdot}324;\ \varepsilon_{12} = 0{\cdot}550;\ \varepsilon_{23} = 0{\cdot}103,$$

und die maximalen Verluste sind:

in Punkt 3: 0·977
„ „ 4: 0·828
„ „ 5: 0·828
„ „ 6: 0·977
„ „ 7: 1·003.

Der wirkliche Kupferaufwand ist hier:

$$V'' = 11350 \text{ cm}^3 = 1{\cdot}095\ V = 1{\cdot}069\ V'.$$

Er übersteigt das theoretisch mögliche Minimum des Kupfervolumens in diesem Falle also nur um 9·5 %, das praktische Minimum um 6·9 %, d. h. beide Ausführungen sind in Beziehung auf Kupferaufwand gleichwertig. Dagegen ist die zweite Querschnittsbemessung der ersteren aus dem Grunde vorzuziehen, weil wir bei ihr mit vier Querschnitten auskommen, und ein Wechsel derselben nur in den Verzweigungspunkten statt hat, in denen ja so wie so Lötungen vorgenommen werden müssen, während wir im ersten Falle sechs verschiedene Querschnitte haben, und Wechsel derselben auch in den Strecken zwischen den Verzweigungspunkten vorkommen.

3. Berücksichtigung des Hauptstranges allein; konstante Stromdichte.

Als Hauptstrang haben wir die Strecke 0127 zu betrachten, da $(10 \cdot 15 + 10 \cdot 10) > 10 \cdot 20$ ist; ebenso treten die Zweige 14 und 15 gegen 12 zurück. Nach Gleichung (IX) ist:

$$j = \frac{\varepsilon}{\varrho l_n} = \frac{1}{0{\cdot}018 \cdot 90} = 0{\cdot}617.$$

Also nach Gleichung (X):

$$q_{01} = \frac{135}{0{\cdot}617} = 218 \doteq 240$$

$$q_{12} = \frac{58}{0{\cdot}617} = 93{\cdot}0 \doteq 95$$

$$q_{27} = \frac{12{\cdot}5}{0{\cdot}617} = 20{\cdot}2 \doteq 16,$$

da die fiktiven Ströme

$$J_0 = 135;\ J_{12} = 58;\ J_{27} = 12{\cdot}5;\ J_{14} = J_{15} = 23{\cdot}3;\ J_{26} = 10.$$

Die Spannungsverluste sind:

$$\varepsilon_{01} = \frac{135 \cdot 20 \cdot 0{\cdot}018}{240} = 0{\cdot}203$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{58 \cdot 50 \cdot 0{\cdot}018}{95} = 0{\cdot}550$$

$$\varepsilon_{27} = \frac{12{\cdot}5 \cdot 20 \cdot 0{\cdot}018}{16} = 0{\cdot}281,$$

also

$$\varepsilon = 1{\cdot}034 \text{ (anstatt } 1{\cdot}0).$$

Für die Zweigstrecken wird, da $\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0{\cdot}797$ und $\varepsilon - \varepsilon_{02} = 0{\cdot}247$,

$$q_{14} = q_{15} = \frac{23{\cdot}3 \cdot 30 \cdot 0{\cdot}018}{0{\cdot}797} = 15{\cdot}8 \sim 16$$

$$q_{23} = q_{26} = \frac{10 \cdot 20 \cdot 0{\cdot}018}{0{\cdot}247} = 14{\cdot}6 \sim 16,$$

also die maximalen Spannungsverluste in den Punkten 3, 4, 5 und 6 werden etwas kleiner als 1 Volt. Der wirkliche Kupferaufwand ist:

$$V''' = 11470 \text{ cm}^3 = 1{\cdot}11\ V = 1{\cdot}08\ V' = 1{\cdot}01\ V'',$$

also um etwa 11 % grösser als das theoretische und 8 % grösser als das praktische Minimum; dem Kupferaufwand bei konstantem Querschnitt ist er praktisch gleich.

4. Berücksichtigung des Hauptstranges allein; konstanter Querschnitt.

Hier wird nach Gleichung (VII):

$$q = \frac{0{\cdot}018}{1}(10 \cdot 140 + 10 \cdot 130 + 30 \cdot 70 + 20 \cdot 40 + 10 \cdot 15 + 10 \cdot 10)$$
$$= 105 \sim 120.$$

Für q_{27} kann demnach ein kleinerer Querschnitt gewählt werden. Es ist:

$$\varepsilon_{01} = 0{\cdot}405; \ \varepsilon_{12} = 0{\cdot}435$$

$$\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0{\cdot}595; \ \varepsilon - \varepsilon_{02} = 0{\cdot}160,$$

also:

$$q_{14} = q_{15} = 21{\cdot}2 \sim 25$$

$$q_{27} = 28{\cdot}1 \sim 25$$

$$q_{23} = q_{26} = 22{\cdot}5 \sim 25.$$

Hier haben die Querschnitte der Zweigleitungen noch günstige Dimensionen angenommen, da wir den Querschnitt des ersten Teils der Leitung verstärken mussten, weil der berechnete kein Normalquerschnitt war; wir näherten uns also dem vorgehenden Fall 3. Nehmen wir dagegen an, der berechnete Querschnitt könne verlegt werden, setzen wir also $q = 105$ in die Rechnung ein, so erhalten wir:

$$\varepsilon_{01} = 0{\cdot}463; \ \varepsilon_{12} = 0{\cdot}496; \ \varepsilon_{27} = 0{\cdot}041,$$

also

$$\varepsilon - \varepsilon_{01} = 0{\cdot}537$$

$$q_{14} = 23{\cdot}4 = q_{15}$$

$$q_{26} = 87{\cdot}8 = q_{23}.$$

Die den geringeren Strom führenden Zweigleitungen 23 und 26 erhalten einen bedeutend grösseren Querschnitt als die Zweige 14 und 15.

Ferner wird der Kupferaufwand bei den fabrikationsmässigen Querschnitten:

$$V^{IV} = 11400 \text{ cm}^3 = 1{\cdot}10\ V = 1{\cdot}00\ V''',$$

dagegen bei Verlegung der berechneten Querschnitte:

$$V^V = 14370 \text{ cm}^3 = 1{\cdot}39\ V' = 1{\cdot}25\ V'''.$$

Im letzten Falle würde der Kupferaufwand das theoretische Minimum um 39 %, denjenigen für konstante Stromdichte um 25 % übersteigen.

Wechselstrom-Stromkreise.

46. Bezeichnungen und Definitionen.

In Wechselstromkreisen treten an Stelle des Widerstandes w und der Leitfähigkeit g bekanntlich der Wechselstromwiderstand oder die Impedanz z und die Admittanz y, und zwar addieren sich, genau wie in Gleichstromkreisen die ersteren, in Wechselstromkreisen die Impedanzen bei Reihenschaltung, die Admittanzen bei Parallelschaltung, nur ist die Addition wie bei Vektorgrössen geometrisch zu vollziehen, obwohl Impedanz und Admittanz skalare Grössen sind, die erst durch Multiplikation mit den Vektoren $\dot{J}$ bezw. $\dot{\mathcal{E}}$ zu Vektorgrössen werden. Um die

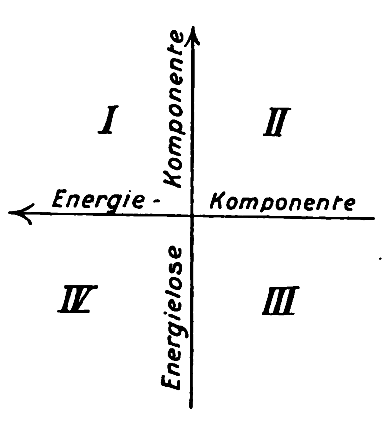


Fig. 34.

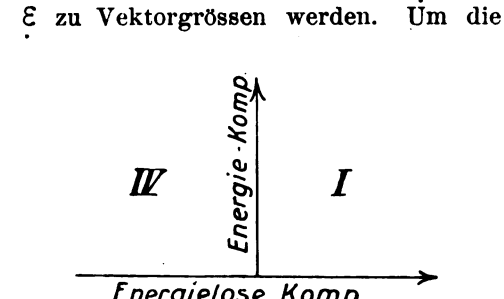


Fig. 35.

geometrischen Operationen in arithmetische zu verwandeln, stellt man die Wechselstromgrössen als komplexe Ausdrücke dar,[1] indem man den einen der beiden die Energie bestimmenden Vektoren $\dot{\mathfrak{E}}$ oder $\dot{J}$ in eine zum anderen Vektor parallele, die Energiekomponente, und in eine dazu senkrechte, die energielose Komponente, oder aber beide Vektoren in die entsprechenden um 90° gegeneinander verschobenen Komponenten zerlegt und der energielosen Komponente zur Kennzeichnung das Zeichen $j = \sqrt{-1}$ beifügt.

Wenden wir zur graphischen Darstellung der Vektorgrössen von den beiden in der Mathematik gebräuchlichen Koordinatensystemen das rechtsdrehende (Fig. 34) an, indem wir, wie gewöhnlich, die Energiekomponente in der Richtung der Abscisse, die energielose Komponente in der Richtung der Ordinate auftragen, so brauchen wir, da sich die Phasenverschiebungswinkel im allgemeinen zwischen 0 und $\pm$ 90° bewegen, vorzugsweise den ersten und vierten Quadrant. Der bequemeren Zeichnung wegen drehen wir daher

---

1) S. Hdb. I, 2, S. 36. Die komplexen Grössen sind zuerst von HELMHOLTZ (Telephon und Klangfarbe, Berliner Akademie 1878) zur Bezeichnung elektrischer Vektoren verwandt worden. Allgemein wurde diese Bezeichnungsweise in elektrotechnischen Kreisen bekannt durch die Arbeiten von FRANKE (ETZ 1891, S. 451) und besonders durch die von C. P. STEINMETZ (ETZ 1893 ff.)

das ganze Koordinatensystem um 90^0 in der Drehrichtung der Vektoren und erhalten so das in Fig. 35 dargestellte Koordinatensystem, in dem die Energiekomponenten parallel zur Ordinatenachse, die energielosen Komponenten in der Richtung der Abscissenachse aufgetragen werden, und zwar in der positiven Richtung die energieverzehrenden bezw. die voreilenden, positivem Winkel φ entsprechenden energielosen Komponenten, die energieerzeugenden bezw. die nacheilenden, negativem Winkel φ entsprechenden energielosen Komponenten in der negativen Richtung.

Stellen also ganz allgemein $O\mathcal{E} = \underset{\cdot}{\mathcal{E}}$[1]) und $OJ = \underset{\cdot}{J}$ die zusammengehörigen Spannungs- und Stromvektoren eines Stromkreises dar (Fig. 36), deren Grössen durch die Längen $O\mathcal{E} = \mathcal{E}$ und $OJ = J$ und deren Richtung durch die Winkel φ_1 und φ_2 gegen die Ordinatenachse (Achse der Energiekomponenten) gegeben sind, so eilt in der Darstellung der Figur, wo $\sphericalangle\, \varphi_1 > \varphi_2$ ist, die Spannung dem Strom vor, oder umgekehrt der Strom der Spannung nach. Wir bezeichnen dieses Verhältnis nach HEINKE[2]) kurz, indem wir für Voreilung den ersten, für Nacheilung den vierten Koordinatenquadrant zwischen die beiden Vektoren setzen, also

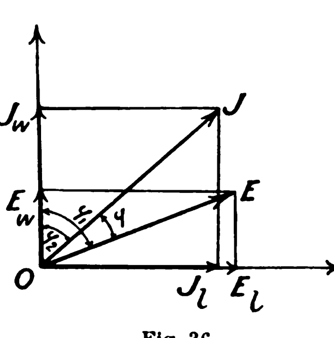


Fig. 36.

$$\underset{\cdot}{\mathcal{E}} \llcorner \underset{\cdot}{J} \text{ bezw. } \underset{\cdot}{J} \lrcorner \underset{\cdot}{\mathcal{E}}$$

und „$\mathcal{E}$ vorwinklig J" bezw. „J nachwinklig $\mathcal{E}$" lesen.

Da beide Vektoren im ersten Quadrant liegen, so haben wir für die Zerlegung von $\underset{\cdot}{\mathcal{E}}$ und $\underset{\cdot}{J}$ folgende Schreibweise, wenn $\mathcal{E}_w$ und J_w die Energiekomponenten, $\mathcal{E}_l$ und J_l die energielosen Komponenten bezeichnen:

$$\underset{\cdot}{\mathcal{E}} = \mathcal{E}_w + j\mathcal{E}_l = \mathcal{E}\,(\cos\varphi_1 + j\sin\varphi_1) = \mathcal{E}\, e^{j\varphi_1}$$
$$\underset{\cdot}{J} = J_w + jJ_l = J\,(\cos\varphi_2 + j\sin\varphi_2) = J\, e^{j\varphi_2},$$

wobei e die Basis der natürlichen Logarithmen, also 2·71828 . . bezeichnet. Aus dieser Darstellung erhält man daher rückwärts die Länge und den Richtungswinkel der Vektoren durch die Beziehungen:

$$\mathcal{E} = \sqrt{\mathcal{E}_w^2 + \mathcal{E}_l^2} \qquad \operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{\mathcal{E}_l}{\mathcal{E}_w}$$
$$J = \sqrt{J_w^2 + J_l^2} \qquad \operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{J_l}{J_w}.$$

Die von den beiden Vektoren geleistete Energie $\mathfrak{E}'$ ist gleich dem skalaren Produkt beider, also

$$\mathfrak{E}' = \mathcal{E} J \cos\varphi$$

d. h. bei einphasigem Wechselstrom ist die gesamte Leistung

$$\mathfrak{E} = 2\,\mathfrak{E}' = 2\,\mathcal{E} J\cos\varphi = EJ\cos\varphi$$

und bei Drehstrom

$$\mathfrak{E} = 3\,\mathfrak{E}' = 3\,\mathcal{E} J\cos\varphi = \sqrt{3}\, EJ\cos\varphi.$$

1) $\underset{\cdot}{\mathcal{E}}$ stellt stets die Spannung gegen den Nullpunkt des Systems, E die Spannung zwischen zwei Leitern dar. Vgl. Fussnote 1, S. 2.

2) Hdb. I, 2, S. 94 mit einer kleinen Änderung entsprechend der geänderten Stellung unseres Koordinatensystems.

47. Die Leitungskonstanten und ihre Beziehungen zu einander.

Ferner sind analog dem Widerstand und der Leitfähigkeit bei Gleichstrom die Impedanz und Admittanz definiert als Quotienten der beiden Vektoren $\dot{\mathfrak{E}}$ und $\dot{J}$, nämlich

$$Z = \frac{\dot{\mathfrak{E}}}{\dot{J}} \text{ und } Y = \frac{\dot{J}}{\dot{\mathfrak{E}}}.$$

Daher wird

$$\left.\begin{aligned} Z &= \frac{\mathfrak{E}}{J}\, e^{j(\varphi_1-\varphi_2)} = \frac{\mathfrak{E}}{J}\, e^{j\varphi} \\ Y &= \frac{J}{\mathfrak{E}}\, e^{j(\varphi_2-\varphi_1)} = \frac{\mathfrak{E}}{J}\, e^{-j\varphi} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (52)$$

Z und Y sind also ebenfalls komplexe Grössen, die aber als Skalare nicht mehr von der Lage der beiden Vektoren $\dot{\mathfrak{E}}$ und $\dot{J}$ in der Koordinatenebene, sondern nur von ihrer Lage zu einander, also von dem $\measuredangle\,(\dot{\mathfrak{E}}\,\dot{J}) = \varphi$ abhängen. Bezeichnen wir die Länge von Z und Y mit $\frac{\mathfrak{E}}{J} = z$ und $\frac{J}{\mathfrak{E}} = y$ und ihre energieverzehrenden Komponenten mit w, „wirksamer Widerstand" oder Resistanz, und g, „wirksame Leitfähigkeit" oder Konduktanz, ihre energielosen Komponenten mit x, Reaktanz, und b, Suszeptanz,[1]) so wird nach Gleichung (52):

$$\left.\begin{aligned} Z &= z\,(\cos\varphi + j\sin\varphi) = w + jx \quad \dot{\mathfrak{E}} \llcorner \dot{J} \\ Y &= y\,(\cos\varphi - j\sin\varphi) = g - jb \quad \dot{J} \lrcorner \dot{\mathfrak{E}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (53)$$

und entsprechend würde:

$$\left.\begin{aligned} Z &= z\,(\cos\varphi - j\sin\varphi) = w - jx \quad \dot{\mathfrak{E}} \lrcorner \dot{J} \\ Y &= y\,(\cos\varphi + j\sin\varphi) = g + jb \quad \dot{J} \llcorner \dot{\mathfrak{E}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (53a)$$

Ferner ist stets:

$$Z = \frac{1}{Y} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (54)$$

oder:

$$(w + jx)\,(g - jb) = 1$$
$$(w - jx)\,(g + jb) = 1$$

d. h. aber:

$$wg + xb = 1$$
$$wb - xg = 0$$

woraus die später abgeleitete Formel $g = \frac{w}{z^2}$ folgt.

Wir haben also für die Bestimmung des Vorzeichens für den imaginären Teil die folgende einfache Regel:

Vor[nach]eilende Spannung ($\varphi = \measuredangle\,(\mathfrak{E}J) > [<]\ 0$) bedingt positive [negative] Reaktanz, und entsprechend nach[vor]eilender Strom ($\varphi = \measuredangle\,(J\mathfrak{E}) < [>]\ 0$) negative [positive] Suszeptanz.

---

1) Über die Benennung dieser Grössen s. FELDMANN, ETZ 1898, S. 698.

Die Beziehungen zwischen den Leitungskonstanten z und y und ihren Komponenten lassen sich nach Fig. 37 a und b sofort ablesen. Es ist:

$$\left.\begin{array}{ll}
\text{Impedanz} \quad \ldots\ldots & z = \sqrt{w^2 + x^2} = \frac{1}{y} \\
\text{Admittanz} \quad \ldots\ldots & y = \sqrt{g^2 + b^2} = \frac{1}{z} \\
\text{Wirksamer Widerstand} \;. & w = z \cos\varphi = \frac{g}{y^2} \\
\text{Wirksame Reaktanz} \quad . & x = z \sin\varphi = \frac{b}{y^2} \\
\text{Wirksame Leitfähigkeit} & g = y \cos\varphi = \frac{w}{z^2} \\
\text{Wirksame Suszeptanz} \quad . & b = y \sin\varphi = \frac{x}{z^2}
\end{array}\right\} \quad \ldots \quad (55)$$

Ferner: $\operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{w} = \frac{b}{g}$; $\sin\varphi = \frac{x}{z} = \frac{b}{y}$; $\cos\varphi = \frac{w}{z} = \frac{g}{y}$.

Während also bei Gleichstromkreisen der Widerstand bezw. die Leitfähigkeit die einzige charakteristische Leitungskonstante ist, müssen bei Wechselstromkreisen ausser dem wirksamen Widerstande bezw. der wirksamen

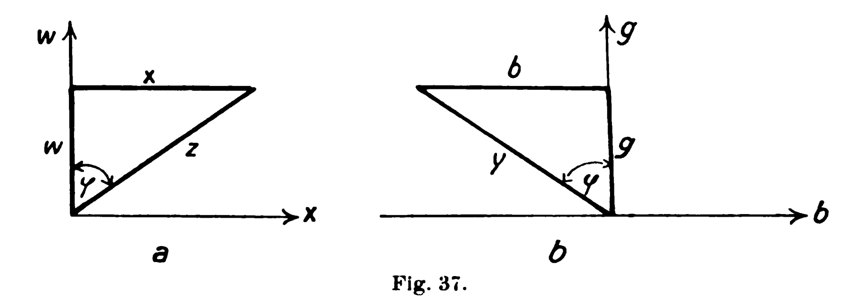


Fig. 37.

Leitfähigkeit die Reaktanz bezw. Suszeptanz oder der Phasenverschiebungswinkel φ bekannt sein, um die Leitungsimpedanz bezw. Admittanz eindeutig zu bestimmen. Sind aber die Widerstands- bezw. Leitfähigkeitskonstanten des Stromkreises gegeben, so lässt sich, ganz wie bei Gleichstrom, der Stromvektor aus dem Spannungsvektor mit Hilfe der Leitfähigkeitskonstanten y, g und b, der Spannungsvektor aus dem Stromvektor mit Hilfe der Widerstandskonstanten z, w und x bestimmen, und es ist bei gegebenem $\underset{\cdot}{J}$ (Fig. 38):

$$\underset{\cdot}{E} = \underset{\cdot}{J} Z = \underset{\cdot}{J}(w + jx) \left[= \frac{\underset{\cdot}{J}}{g - jb}\right], \text{ wenn } \underset{\cdot}{E} \llcorner \underset{\cdot}{J}$$

$$\underset{\cdot}{E} = \underset{\cdot}{J} Z = \underset{\cdot}{J}(w - jx) \left[= \frac{\underset{\cdot}{J}}{g + jb}\right], \text{ wenn } \underset{\cdot}{E} \lrcorner \underset{\cdot}{J}$$

und bei gegebenem $\underset{\cdot}{E}$ (Fig. 39):

$$\underset{\cdot}{J} = \underset{\cdot}{E} Y = \underset{\cdot}{E}(g + jb) \left[= \frac{\underset{\cdot}{E}}{w - jx}\right], \text{ wenn } \underset{\cdot}{J} \llcorner \underset{\cdot}{E}$$

$$\underset{\cdot}{J} = \underset{\cdot}{E} Y = \underset{\cdot}{E}(g + jb) \left[= \frac{\underset{\cdot}{E}}{w + jx}\right], \text{ wenn } \underset{\cdot}{J} \lrcorner \underset{\cdot}{E}.$$

Sind nun die Energieverbraucher in Reihe geschaltet, so wird der Strom konstant gehalten, ist also als gegeben anzusehen, und die resultierende Spannung ist:

$$E = \sum_1^n E_\nu = J \sum_1^n (w_\nu + j x_\nu) = J(w + jx) = Jz \quad . \quad . \quad (56)$$

und zwar ist x_ν positiv einzusetzen bei voreilender Spannung, d. h. induktiver Reaktanz, negativ bei nacheilender Spannung, d. h. Kapazitätsreaktanz. Ferner ist

$$w = \sum_1^n w_\nu;\; x = \sum_1^n x_\nu;\; z = \sqrt{w^2 + x^2};\; \operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{w} \quad . \quad (57)$$

Bei Parallelschaltung der Energieverbraucher ist die Spannung konstant und gegeben, daher wird die resultierende Stromstärke:

$$J = \sum_1^n J_\nu = E \sum_1^n (g_\nu + j b_\nu) = E(g + jb) = Ey \quad . \quad . \quad (58)$$

Hier ist b positiv einzusetzen bei voreilendem Strom d. h. Kapazitätssuszeptanz, negativ bei nacheilendem Strom, d. h. induktiver Suszeptanz. Es ist:

$$g = \sum_1^n g_\nu;\; b = \sum_1^n b_\nu;\; y = \sqrt{g^2 + b^2};\; \operatorname{tg}\varphi = \frac{g}{b} \quad . \quad . \quad . \quad (59)$$

Hiermit ist gezeigt, dass ein prinzipieller Unterschied in der Behandlung von Gleich- und Wechselstromkreisen nicht besteht; die Ermittlung der Strom-

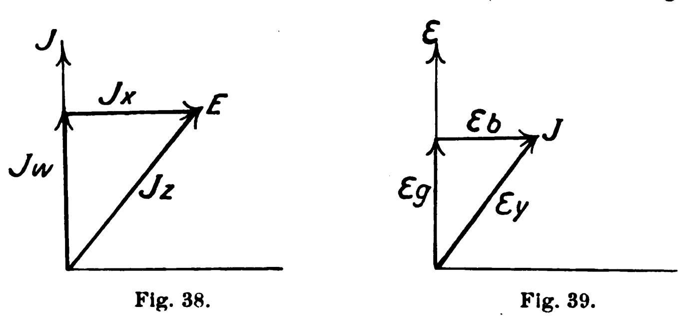


Fig. 38. Fig. 39.

und Spannungsverteilung ist in beiden Fällen die gleiche, sobald die Konstanten des Stromkreises bekannt sind. Jedoch ist die Bestimmung der letzteren nicht mehr ganz so einfach wie bei Gleichstrom, da sie bei Wechselstrom oft nicht konstant sind, sondern von der Grösse der Strom- und Spannungsvektoren und von der Frequenz abhängen.

48. Die Bestimmung der Leitungskonstanten des Wechselstromkreises. Widerstand.

Der wirksame Widerstand des Wechselstromkreises ist definiert als die Energie verzehrende Komponente der Impedanz, ist also gleich dem Quotient aus der gesamten in Wärme verwandelten Energie durch das Quadrat des den Stromkreis durchfliessenden Stromes; also wenn $\mathfrak{E}$ die in Wärme verwandelte Energie bezeichnet:

$$w = \frac{\mathfrak{E}}{J^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (60)$$

Der wirksame Widerstand fällt demnach nur dann mit dem Ohm schen Widerstand des Gleichstromkreises zusammen, wenn in dem Wechselstromkreise

(abgesehen von mechanischer, chemischer u. s. w. Arbeit) alle Energie als JOULEsche Wärme im Kupfer verzehrt wird, wenn also die magnetische und dielektrische Permeabilität des den Stromkreis umgebenden Mediums und des Leitungsmaterials von der Stromstärke unabhängig sind, und wenn die Stromdichte im ganzen Leitungsquerschnitt gleichmässig ist; mit andern Worten, wenn weder magnetische noch dielektrische Hysteresisarbeit noch Wirbelstromarbeit in dem Stromkreis oder dem umgebenden Medium zu leisten sind. Daraus folgt aber sofort, dass im allgemeinen der wirksame Widerstand sowie die wirksame Leitfähigkeit von Wechselstromkreisen von Spannung, Strom und Frequenz abhängen, also nicht mehr, wie bei Gleichstrom, Konstanten des Stromkreises im eigentlichen Sinne sind. Im besonderen ist der Widerstand auch bei völliger Abwesenheit von magnetischer und dielektrischer Hysteresis von der Frequenz abhängig und steigt infolge des sogenannten Hauteffektes (Skineffektes)[1]) mit steigender Periodenzahl und mit dem Leitungsdurchmesser. Über diese Abhängigkeit giebt die folgende von HOSPITALIER nach der Formel von LORD KELVIN berechnete Tabelle VI Auskunft, in der k den Reduktionsfaktor bezeichnet, mit dem der Gleichstromwiderstand eines Kupferdrahtes w_g zu multiplizieren ist, um den durch Hauteffekt vergrösserten wirksamen Wechselstromwiderstand w_w zu erhalten. p ist die Frequenz (Periodenzahl in einer Sekunde) und d der Drahtdurchmesser in cm.

Tabelle VI.

Reduktionsfaktor für den Einfluss des Hauteffektes.

pd^2	$k = \frac{w_w}{w_g}$	pd^2	$k = \frac{w_w}{w_g}$
0	1·0000	1620	1·8628
20	1·0000	2000	2·0430
80	1·0001	2420	2·2190
180	1·0258	2880	2·3937
320	1·0805	5120	3·0956
500	1·1747	8000	3·7940
720	1·3180	18000	5·5732
980	1·4920	32000	7·3250
1280	1·6778	—	—

Die Tabelle gilt natürlich nicht für Eisendrähte, da ja ausdrücklich die Abwesenheit von magnetischer Hysteresis angenommen wurde. Aus den Zahlen ist ersichtlich, dass für die in Deutschland angewendete normale Frequenz 50 ein Durchmesser von 1·6 cm erst eine Vergrösserung des OHMschen Widerstandes um 0·1 % hervorrufen würde, dass also im allgemeinen die Widerstandserhöhung infolge Hauteffektes für praktische Fälle vollständig zu vernachlässigen ist.

Der wirksame Widerstand von Wechselstromkreisen wird also bei Abwesenheit von magnetischer und dielektrischer Hysteresis, also z. B. bei Luftleitungen aus Kupferdraht, wie bei Gleichstrom berechnet und mit dem

1) GALILEO FERRARIS, Wissenschaftliche Grundlagen.

Koeffizienten k der Tabelle VI multipliziert. Ist dagegen die Permeabilität des Drahtmaterials oder des dieses umgebenden Mediums nicht konstant, so muss der wirksame Widerstand durch die später zu behandelnden Messungen [55] bestimmt werden (Kabel mit Eisenarmierung!).

49. Induktivität.

Die Induktivität [1]) hat ihrer physikalischen Bedeutung nach nur bei geschlossenen Stromkreisen einen Sinn. Sie bedeutet diejenige Zahl der magnetischen Induktionslinien, die in einer Stromschleife (bezw. Spule) entstehen oder verschwinden, wenn die Stromstärke sich in der Zeiteinheit um die Einheit ändert. Gleichwohl können wir aus Bequemlichkeitsgründen rechnungsmässig die Induktivität in den praktisch wichtigsten Fällen, nämlich bei symmetrisch belasteten Wechsel- und Drehstromleitungen, auch auf einen einzelnen Leiter beziehen, da die Aufstellung der Gleichung für die Änderung des Induktionsflusses [2]) zeigt, dass sich diese Leitungen durch einen ideellen Leiter ersetzen lassen, der bei Anwendung der im folgenden angegebenen Konstanten dasselbe Verhalten zeigt, wie die ersteren. Ist die Voraussetzung der symmetrischen Belastung nicht erfüllt (also auch bei mehreren parallel geführten Leitungen), so muss man stets auf die Berechnung des magnetischen Feldes zurückgehen und für jeden einzelnen Stromkreis die von diesem wie von den übrigen stromführenden Leitungen in ihm hervorgerufenen Induktionslinien feststellen, oder die Induktivität durch Messung ermitteln [55].

Für die Berechnung der Induktivität in den beiden erwähnten Fällen gilt sowohl für Leitungen als für verseilte Kabel die Formel:

$$L = 2 \log \text{nat} \frac{D}{r} + 0{\cdot}5 \text{ [cm]}$$

$$= 4{\cdot}606 \left(\log \frac{D}{\sqrt{q}} + 1{\cdot}748\right) 10^{-7} \left[\frac{\text{Henry}}{m}\right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (61)$$

worin L die Induktivität für die Einheit der einfachen Leitungslänge in den angegebenen Einheiten, D den Abstand der Drahtachsen voneinander, $2r$ den Drahtdurchmesser, beide in cm, und q den Drahtquerschnitt in mm^2 bedeutet. Hierbei ist vorausgesetzt, dass die drei Drähte der Drehstromleitung in Form eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet sind, und dass im Falle des zwei- oder dreiadrigen verseilten Erdkabels keine Eisenarmierung vorhanden und der Bleimantel geerdet ist. Bei den in der Praxis fast ausschliesslich zur Verwendung gelangenden eisenarmierten Kabeln lässt sich die Induktivität auch in den angeführten einfachsten Fällen nicht rechnerisch ermitteln, sondern muss ebenso wie in sonstigen Fällen komplizierterer Leitungsführung durch Messung festgestellt werden [55].

50. Induktive Reaktanz.

Die Induktivität tritt nach dem Vorhergehenden stets in Verbindung mit Widerstand auf, und zwar im allgemeinen als gleichmässig über den ganzen Widerstand verteilte Induktivität. Da sie von der Stromstärke abhängt, so

1) Das Wort „Induktivität“ zur Bezeichnung der Differenz „Koeffizient der Selbstinduktion — Koeffizient der gegenseitigen Induktion“ der beiden Drähte einer Stromschleife wurde vom Ausschuss des E. T. V. vorgeschlagen. ETZ 1905, S. 460.

2) F. Breisig, Über die Definitionen der elektrischen Eigenschaften von Mehrfach-Leitungssystemen, ETZ 1902, S. 1137. Herzog-Feldmann, Die Berechnung elektrischer Leitungsnetze. Leo Lichtenstein, Zur Berechnung und experimentellen Bestimmung der Selbstinduktion und Stromrückleitung von Einphasen- und Drehstromkabeln, Z. f. E. 1904, S. 443. Bezüglich der folgenden Formeln siehe auch Galileo Ferraris, Wissenschaftliche Grundlagen und Emil Cohn, Das elektromagnetische Feld, Leipzig 1900.

können wir sie mit dem Widerstand in Reihe geschaltet denken (Fig. 40). Ist dann J der im Stromkreise (Leitung) fliessende Strom, E die darin verzehrte Spannung, w der Widerstand und L die Induktivität für 1 m, also lL die gesamte Induktivität, und $\omega = 2\pi p$ die Periodenzahl in 2π Sekunden, so wird:

$$\dot{E} = \dot{J}(w + jlL\omega) = \dot{J}(w + jx) = \dot{J}z \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (62)$$

Also die Impedanz ist

$$z = w + jx = w + jlL\omega = \sqrt{w^2 + (lL\omega)^2} \quad . \quad . \quad . \quad (63)$$

und die induktive Reaktanz

$$x = lL\omega \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (64)$$

51. Kapazität. Auch die wirksame Kapazität kann nur für einige einfache Fälle der Leitungsführung berechnet werden;[1]) in komplizierteren Fällen kann man durch Messung des Ladestroms die wirksame Kapazität selbst in den Fällen be-

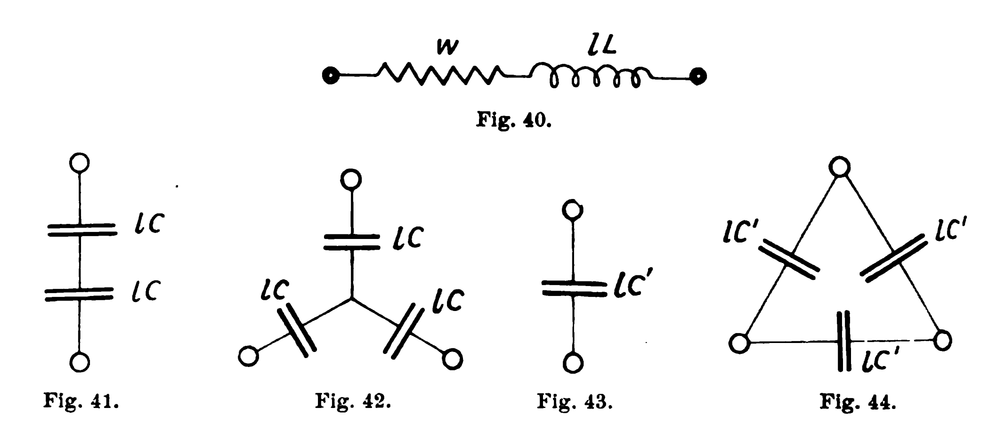


Fig. 40.

Fig. 41. Fig. 42. Fig. 43. Fig. 44.

stimmen, in denen eine wahre, der Grundgleichung $Q = CV$ entsprechende Kapazität überhaupt nicht existiert [55].

Um über die Anwendung der folgenden Kapazitätsformeln[2]) keine Unklarheit entstehen zu lassen, bemerke ich dazu folgendes: Zwecks einfacher Berechnung des Leitungsquerschnittes aus dem Spannungsabfall, dem Linienstrom und der Impedanz wurden in den vorhergehenden Entwickelungen Widerstand und Induktivität stets auf den einfachen Leiter von der Länge l bezogen, so dass sich z. B. die gesamte Induktivität für ein Zweileiterkabel zu $2lL$, für ein Drehstromkabel zu $3lL$ berechnet. Wollen wir in Übereinstimmung hiermit auch die Kapazitätsreaktanz für den einfachen Leiter in

1) Aus der reichen, diesen Gegenstand behandelnden Litteratur seien verzeichnet: Breisig, Über die Bestimmung der elektrischen Kapazität, ETZ 1898, S. 772 und 1899, S. 127; Über die Definition der elektrischen Eigenschaften, ETZ 1902, S. 1137; Vorschläge zur Definition der elektrischen Eigenschaften, ETZ 1905, S. 460. H. Kath, Die Kapazität von Kabeln ETZ 1903, S. 38. Leo Lichtenstein, Über die rechnerische Bestimmung der Kapazität, ETZ 1904, S. 106.

2) Die verschiedenen Autoren definieren die wirksame (resultierende) Kapazität je nach ihren Zwecken verschieden, und zwar entweder als Kapazität zwischen zwei Leitern oder als solche zwischen einem Leiter und Erde bezw. dem neutralen Punkt des Systems. Hier wird nur von der letzten Definition Gebrauch gemacht.

der Form $\frac{10^6}{jlC\omega}$ erhalten (worin C die Kapazität der Längeneinheit in Mikrofarad bedeutet), so müssen wir die wirksame Kapazität $lC\,10^{-6}$ auf den einfachen Leiter gegen Erde oder den neutralen Punkt beziehen, wir müssen sie also nach den Figuren 41 und 42 anordnen. Für das Zweileiterkabel definieren wir demgemäss:

$$\frac{Q}{\mathcal{E}} = l\,C \cdot 10^{-6} = \frac{Q}{E/2}, \quad \ldots \ldots \quad (65)$$

und für das Drehstromkabel

$$\frac{Q}{\mathcal{E}} = l\,C \cdot 10^{-6} = \frac{Q}{E/\sqrt{3}}, \quad \ldots \ldots \quad (66)$$

wenn wie gewöhnlich $\mathcal{E}$ das Potential des Leiters (Spannung gegen den neutralen Punkt bezw. Erde), E die Spannung zwischen zwei Leitern (bei Drehstrom also die verkettete Spannung) bedeutet.

Dagegen würde sich im Vergleich mit unserer Definition die Kapazität C' zwischen zwei Leitern auf folgendem Wege ergeben:

Da bei der Schaltung der Kapazitäten nach Fig. 43 und 44 die auf den Leitern befindliche Ladung Q bezw. der die Leiter durchfliessende Ladestrom J natürlich dieselbe Grösse besitzen wie im Falle der Fig. 41 und 42 — beide Schaltungen sind ja nur verschiedene Darstellungsarten derselben Verhältnisse —, so wird für Wechselstrom:

$$Q = l\,C' \cdot 10^{-6}\,E = l\,C' \cdot 10^{-6} \cdot 2\,\mathcal{E},$$

also ist nach Gleichung (65):

$$l\,C' \cdot 10^{-6} \cdot 2\,\mathcal{E} = l\,C \cdot 10^{-6}\,\mathcal{E},$$

d. h.

$$C' = \frac{1}{2}\,C,$$

und für Drehstrom, wenn wir mit Q' die auf dem Kondensator C' befindliche Elektrizitätsmenge bezeichnen:

$$Q = \sqrt{3}\,Q' = \sqrt{3}\,l\,C' \cdot 10^{-6}\,E = 3\,l\,C' \cdot 10^{-6}\,\mathcal{E},$$

daher nach Gleichung (66):

$$3\,l\,C' \cdot 10^{-6}\,\mathcal{E} = l\,C \cdot 10^{-6}\,\mathcal{E},$$

d. h.

$$C' = \frac{1}{3}\,C.$$

Der mittels C berechnete, in das Dielektrikum eintretende Ladestrom wird bei Zweileiterkabeln

$$J_c = l\,C\omega \cdot 10^{-6}\,\mathcal{E}\ (= l\,C'\omega \cdot 10^{-6}\,E). \quad \ldots \quad (65\,a)$$

J_c ist zugleich der den Leiter durchfliessende Strom und steht senkrecht zu $\mathcal{E}$. Bei Drehstromkabeln dagegen ist der in das Dielektrikum eintretende Strom bei der Definition nach Fig. 42

$$J_c = l\,C\omega \cdot 10^{-6}\,\frac{E}{\sqrt{3}} = l\,C\omega \cdot 10^{-6}\,\mathcal{E} \quad \ldots \quad (66\,a)$$

und steht senkrecht zur Sternspannung $\mathcal{E}$ (Fig. 45), bildet also mit E den Winkel $+120^0$ (und ist demnach gleichgerichtet mit der verketteten Spannung der zweiten Phase); auch hier ist J_c zugleich der den Leiter durchfliessende Strom. Bei der zweiten Darstellung hingegen (Fig. 44) würde entsprechend der Dreieckschaltung der Kondensatoren der Ladestrom jedes Kondensators

$$J_c' = l\,C'\,\omega \cdot 10^{-6}\,E = \frac{1}{3}\,l\,C\omega \cdot 10^{-6}\,\mathcal{E}\,\sqrt{3} = \frac{J_c}{\sqrt{3}}$$

zu E senkrecht stehen, und der die Leitung durchfliessende Strom würde sich wieder zu

$$\sqrt{3} \cdot J_c' = J_c$$

senkrecht zur Sternspannung $\mathcal{E}$ ergeben.

Bei der hier angewendeten Definition der wirksamen Kapazität erhalten wir also, wie ich zusammenfassend nochmals hervorheben will, als Ladestrom der Grösse und Richtung nach stets unmittelbar die in der betrachteten

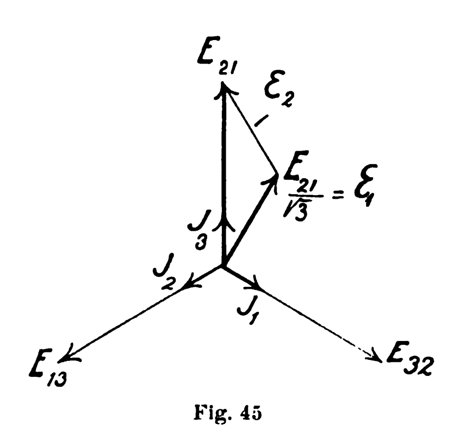


Fig. 45

Leitung fliessende Stromkomponente. Daher ergiebt der Leitungsstrom multipliziert mit der Leiterimpedanz stets der Grösse und Richtung nach den Spannungsabfall im einfachen Leiter.

Die Kapazitätsformeln für Wechsel- und Drehstromleiter erhalten daher die folgende Form:[1])

1. Für parallele Luftleiter, Zweileiter:

$$\left.\begin{aligned} C &= \frac{1}{2 \log \text{nat} \dfrac{D}{r}} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{20}}\ [\text{cm}^{-1}\ \text{sek}^2] \\ &= \frac{2{\cdot}41 \cdot 10^{-5}}{\log \left(17{\cdot}7 \cdot \dfrac{D}{\sqrt{q}}\right)} \left[\frac{Mi}{m}\right] \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (67)$$

1) GALILEO FERRARIS: Wissenschafliche Grundlagen; und COHN: Das elektromagnetische Feld. Vgl. auch LEO LICHTENSTEIN: ETZ 1904, S. 106.

2. Für parallele Luftleiter, Drehstrom:

$$\left.\begin{aligned} C &= \frac{1}{2 \log \text{nat} \dfrac{D}{r}} \cdot \frac{1}{9 \,.\, 10^{20}} \, [\text{cm}^{-1} \text{sek}^2] \\ &= \frac{2{\cdot}41 \cdot 10^{-5}}{\log \left(17{\cdot}7 \cdot \dfrac{D}{\sqrt{q}}\right)} \left[\frac{Mi}{m}\right] \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (68)$$

3. Für Zweileiterkabel (Mantel geerdet):

$$\left.\begin{aligned} C &= \frac{\delta}{2 \log \text{nat} \left(\dfrac{2\,a}{r} \cdot \dfrac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2}\right)} \cdot \frac{1}{9 \,.\, 10^{20}} \, [\text{cm}^{-1} \text{sek}^2] \\ &= \frac{2{\cdot}41 \, \delta \cdot 10^{-5}}{\log \left(\dfrac{2\,a}{r} \cdot \dfrac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2}\right)} \left[\frac{Mi}{m}\right] \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (69)$$

4. Für Drehstromkabel (Mantel geerdet):

$$\left.\begin{aligned} C &= \frac{\delta}{\log \text{nat} \left(\dfrac{3\,a^2}{r^2} \, \dfrac{(R^2 - a^2)^3}{R^6 + a^6}\right)} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{20}} \, [\text{cm}^{-1} \text{sek}^2] \\ &= \frac{4{\cdot}82 \delta \cdot 10^{-5}}{\log \left(\dfrac{3\,a^2}{r^2} \, \dfrac{(R^2 - a^2)^3}{R^6 + a^6}\right)} \left[\frac{Mi}{m}\right] \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (70)$$

Hierin bedeuten:

$C = \frac{Q}{\mathcal{E}} = \frac{\int J dt}{\mathcal{E}}$ die Kapazität eines Leiters für die Einheit der Kabellänge gegen den neutralen Punkt bezw. gegen Erde in den angegebenen Einheiten, falls $\mathcal{E}$ die zwischen dem Leiter und dem neutralen Punkte bezw. Erde herrschende Spannung (das Potential des Leiters) ist.

$Q = \int J dt$ ist die auf jedem der Leiter befindliche Ladung, also wird der Ladestrom

$J = 10^{-6} l C \omega \cdot \mathcal{E}$ (J in Amp., wenn C in Mi, $\mathcal{E}$ in Volt, l in m).

a den Abstand der Leiterachse von der Kabelachse [cm].

D den Abstand der beiden Leiterachsen voneinander [cm], also gleich $2\,a$ bei Zweileiterkabeln und gleich $a\sqrt{3}$ bei Drehstromkabeln.

q den Querschnitt der Leiter [mm²].

r den Halbmesser der Leiter [cm].

R den inneren Halbmesser des Mantels [cm].

δ die Dielektrizitätskonstante des Isoliermaterials.

53. Ableitung.

Die Ableitung A einer Leitung ist übereinstimmend mit dem Vorhergehenden der reziproke Wert ihres Isolationswiderstandes für die Längeneinheit gegen Null bezw. gegen Erde. Ihre rechnerische Bestimmung in Kabeln stösst wegen der Inhomogenität aller unserer Isoliermaterialien auf unüberwindliche Schwierigkeiten, so dass ihre Ermittlung nur auf dem Wege der Messung möglich ist [55]. Bei homogenem Isoliermaterial würden die

folgenden Formeln für die Ableitung im absoluten und praktischen Masssystem gelten:

1. Für Zweileiterkabel:

$$A = \frac{4\pi\gamma}{2 \log \operatorname{nat}\left(\frac{2a}{r}\frac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2}\right)} \; [\mathrm{cm}^{-1}\,\mathrm{sek}]$$

$$= 272 \cdot \frac{\gamma'}{\log\left(\frac{2a}{r}\frac{R^2 - a^2}{R^2 + a^2}\right)} \; [\Omega^{-1}\,\mathrm{m}].$$

2. Für Drehstromkabel:

$$A = \frac{4\pi\gamma}{\log \operatorname{nat}\left(\frac{3a^2}{r^2}\frac{(R^2 - a^2)^3}{R^6 + a^6}\right)} \; [\mathrm{cm}^{-1}\,\mathrm{sek}]$$

$$= 543 \cdot \frac{\gamma'}{\log\left(\frac{3a^2}{r^2}\frac{(R^2 - a^2)^3}{R^6 + a^6}\right)} \; [\Omega^{-1}\,\mathrm{m}],$$

wo γ die spezifische Leitfähigkeit des Isoliermaterials im absoluten Masssystem [cm^{-1} sek], γ' diejenige im praktischen Masssystem [Ω^{-1} cm], also $= 10^9 \gamma$ ist, und die übrigen Grössen dieselbe Bedeutung wie in Abschnitt [51] haben.

Der Ableitungsstrom (Isolationsstrom) für 1 m Leitungslänge hat also in beiden Fällen die Grösse

$$J_a = A\mathfrak{E} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (71)$$

und besitzt die Richtung von $\mathfrak{E}$.

Mithin beträgt die von den Leitern in der Entfernung x vom Anfang ($l - x$ vom Ende) der Leitung fliessende Stromstärke:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{beim Zweileiterkabel} & J_x = (l - x)\, A \cdot \mathfrak{E} = (l - x)\, A \frac{E}{2} \\ \text{beim Drehstromkabel} & J_x = (l - x)\, A \cdot \mathfrak{E} = (l - x)\, A \frac{E}{\sqrt{3}} \end{array}\right\} \quad (72)$$

Der Ableitungsstrom nimmt also von seinem Maximum

$$l J_a = l A \mathfrak{E}$$

bis auf Null ab.

Naturgemäss ist der Einfluss der Ableitung praktisch äusserst gering und kommt erst bei sehr hohen Spannungen in Frage. In der Praxis werden — wie auch aus der Messung dieser Grösse [55] hervorgeht — in die Grösse A alle Energie verzehrenden, also mit $\mathfrak{E}$ gleichphasigen Verluste einbegriffen, mithin ausser der durch Ableitung verursachten Energie auch die infolge dielektrischer Hysteresis und dunkler Entladung auftretender Verluste.

53. Kapazitäts-Suszeptanz. Besitzt ein Kondensator sowohl Kapazität lC als Ableitung lA, so können wir uns dieselben, da beide von der Spannung abhängen, als parallel geschaltet vorstellen (Fig. 46). Ist J_c der Kapazitätsstrom, J_a der Ableitungsstrom, $\mathfrak{E}$ die gemeinsame Spannung, so wird:

$$\dot{J} = J_a + jJ_c = \dot{\mathfrak{E}}\,(lA + jlC\omega \cdot 10^{-6}) = \dot{y}\,\mathfrak{E}, \quad \ldots \quad (73)$$

also die Kapazitätssuszeptanz ist:

$$b = lC\omega \cdot 10^{-6}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (74)$$

Ist, wie in den meisten praktischen Fällen, lA zu vernachlässigen, so wird $y = b$.

54. Wirksame Reaktanz und Suszeptanz.

Besitzt der Stromkreis sowohl Induktivität als Kapazität und Ableitung, so haben wir die folgenden beiden Fälle zu unterscheiden:

1. L und C in Reihe (Fig. 47).

Die Impedanz des induktiven Teils ist

$$z_1 = w_1 + jlL\omega = w_1 + jx_1;$$

diejenige des Kondensators:

$$z_2 = \frac{1}{lA + jlC\omega \cdot 10^{-6}} = w_2 - jx_2,$$

wo gemäss Gleichung (55) [47]

$$w_2 = \frac{g_2}{y_2^2} = \frac{lA}{(lA)^2 + (lC\omega \cdot 10^{-6})^2}; \quad x_2 = \frac{lC\omega \cdot 10^{-6}}{(lA)^2 + (lC\omega \cdot 10^{-6})^2}.$$

Daher wird

$$z = z_1 + z_2 = w_1 + w_2 + j(x_1 - x_2) = w + jx. \quad . \quad . \quad (75)$$

Der wirksame Widerstand wird also:

$$w = w_1 + w_2 = w_1 + \frac{lA}{(lA)^2 + (lC\omega 10^{-6})^2} \quad . \quad . \quad . \quad (76)$$

und die wirksame Reaktanz:

$$x = x_1 - x_2 = lL\omega - \frac{lC\omega \cdot 10^{-6}}{(lA)^2 + (lC\omega 10^{-6})^2} \quad . \quad . \quad . \quad (77)$$

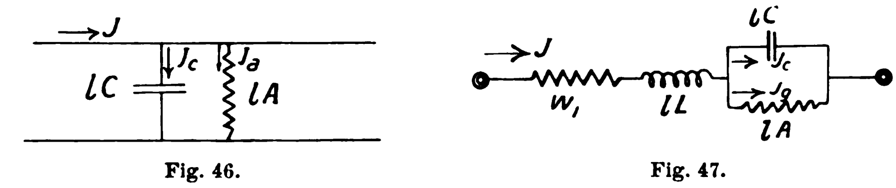


Fig. 46. Fig. 47.

Der Spannungsabfall in dem Stromkreise ist daher:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{J}z = \dot{J}(w + jx). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (78)$$

Die Phasenverschiebung $\varphi = \sphericalangle(\dot{\varepsilon}\,\dot{J})$ ergiebt sich aus:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{w}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (79)$$

Der Winkel φ ist positiv oder negativ zu nehmen, je nachdem die induktive oder Kapazitätsreaktanz überwiegt.

Wird $A = 0$, ist also keine Ableitung vorhanden, so wird:

$$x_2 = \frac{10^6}{lC\omega}; \quad w_2 = 0; \quad z_2 = -jx_2,$$

daher:

$$w = w_1; \quad x = x_1 - x_2 = lL\omega - \frac{10^6}{lC\omega}. \quad . \quad . \quad (80)$$

Die graphische Darstellung würde folgende Konstruktion ergeben:

In dem Stromkreise des Kondensators zerfällt J in die beiden rechtwinklig zu einander stehenden Stromvektoren J_c und J_g (Fig. 48), die infolge der beiden Gleichungen:

$$\frac{J_c}{J_g} = \frac{l\,C\,\omega \cdot 10^{-6}}{l\,A} = \operatorname{tg} \varphi_2$$

$$J_c^2 + J_g^2 = J^2$$

sich berechnen zu:

$$J_c = J\,\frac{l\,C\,\omega}{y_2}\,10^{-6}$$

$$J_g = J\,\frac{l\,A}{y_2}.$$

Daher wird der Spannungsabfall im Kondensatorkreise:

$$\varepsilon_2 = \frac{J_g}{l\,A} = \frac{J_c \cdot 10^6}{l\,C\,\omega} = \frac{J}{y_2}$$

und liegt in der Richtung von J_g bezw. senkrecht zu J_c.

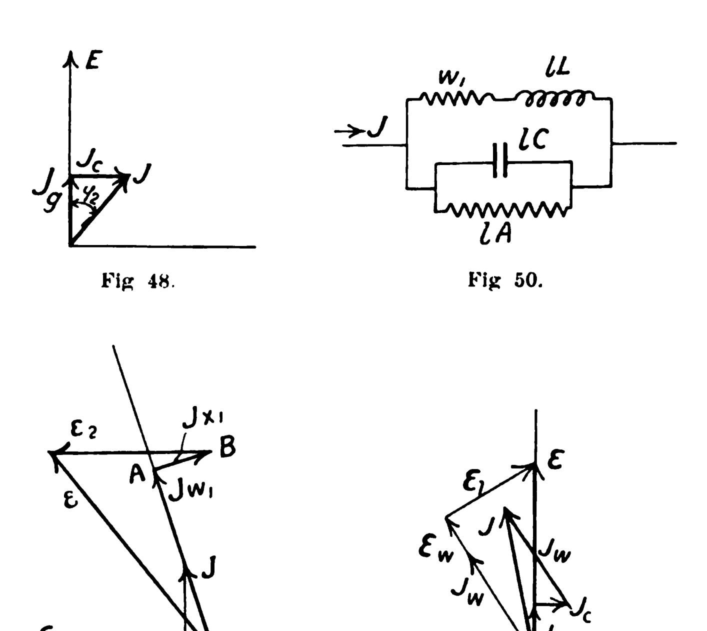


Fig. 48. Fig. 50.

Fig. 49. Fig. 51.

Wir zerlegen demnach (Fig. 49) J in die beiden Komponenten J_c und J_g und bilden $\varepsilon_2 = \frac{J_c}{l\,C\,\omega}\,10^6$ in der Richtung von J_g. In der Richtung von J tragen wir nun $J w_1 = O\,A$, senkrecht dazu in der Richtung der Voreilung $J x_1 = A\,B$ auf und ziehen $B\,C$ parallel und gleich $O\,\varepsilon_2$, dann ist $O\,\mathcal{E} = \varepsilon$ der Spannungsabfall in der Leitung.

2. L und C in Parallelschaltung (Fig. 50).

Hier ist nach Gleichung (55) [47]:

$$y_1 = \frac{1}{w_1 + j\,l\,L\omega} = g_1 - j\,b_1,$$

wo

$$g_1 = \frac{w_1}{z_1^2}; \quad b_1 = \frac{l\,L\omega}{z_1^2}; \quad z_1 = \sqrt{w_1^2 + (l\,L\omega)^2}$$

$$y_2 = l\,A + j\,l\,C\omega \cdot 10^{-6},$$

also ist

$$y = y_1 + y_2 = g_1 + l\,A + j\,(10^{-6}\,l\,C\omega - b_1) = g + j\,b \quad . \quad (81)$$

die wirksame Admittanz und

$$g = g_1 + l\,A = \frac{w_1}{w_1^2 + (l\,L\,\omega)^2} + l\,A \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (82)$$

die wirksame Konduktanz,

$$b = 10^{-6}\,l\,C\omega - b_1 = 10^{-6}\,l\,C\omega - \frac{l\,L\,\omega}{w_1^2 + (l\,L\,\omega)^2} \quad . \quad . \quad (83)$$

die wirksame Suszeptanz. Die Phasenverschiebung $\varphi = \measuredangle\,(\mathfrak{E}\,J)$ ergiebt sich aus $\operatorname{tg}\varphi = \frac{b}{g}$ und ist positiv oder negativ, je nachdem $b \gtrless 0$.

Bei gegebener Spannung $\mathfrak{E}$ berechnet sich der Gesamtstrom zu

$$\dot{J} = \dot{\mathfrak{E}}\,y = \dot{\mathfrak{E}}\,(g + j\,b); \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (84)$$

der den induktiven Widerstand durchfliessende Strom wird:

$$\dot{J}_w = \dot{\mathfrak{E}}\,y_1 = \dot{\mathfrak{E}}\,(g_1 - j\,b_1); \quad \operatorname{tg}\varphi_w = \frac{b_1}{g_1} \quad . \quad . \quad . \quad (85)$$

der unverzweigte Strom des Kondensatorkreises ist

$$\dot{J}_{ca} = \dot{\mathfrak{E}}\,y_2 = \dot{\mathfrak{E}}\,(l\,A + j\,l\,C\omega \cdot 10^{-6}); \quad \operatorname{tg}\varphi_{ca} = \frac{C\omega}{A} \cdot 10^{-6} \quad (86)$$

und dessen Komponenten:

$$\dot{J}_c = \dot{\mathfrak{E}}\,l\,C\omega \cdot 10^{-6}; \quad \varphi_c = 90^0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (87)$$

$$\dot{J}_a = \dot{\mathfrak{E}}\,l\,A; \quad \varphi_a = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (88)$$

Soll dagegen bei bekanntem J der Spannungsabfall in dem Stromkreise ermitteln werden, so berechnen sich zunächst der wirksame Widerstand, die Reaktanz und Impedanz zu:

$$w = \frac{g}{y^2}; \quad x = \frac{b}{y^2}; \quad z = \sqrt{w^2 + x^2} = \frac{1}{y} \quad . \quad . \quad . \quad (89)$$

und daraus der Spannungsabfall zu

$$\varepsilon = J\,z. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (90)$$

Wird wieder $A = 0$, so vereinfacht sich die Gleichung (81) zu

$$y = g_1 + j\,(l\,C\omega \cdot 10^{-6} - b_1) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (81\,a)$$

Die graphische Konstruktion des Gesamtstromes J bei gegebenem $\mathcal{E}$ ist ganz analog der im Fall 1 dieses Abschnitts behandelten Darstellung des Spannungsabfalls bei Reihenschaltung, man hat nur die Ströme und Spannungen miteinander zu vertauschen:

Die Spannung $\mathcal{E}$ zerfällt im induktiven Stromkreise in zwei Komponenten

$$\mathcal{E}_w = \mathcal{E}\,\frac{w_1}{z_1} \quad \text{und} \quad \mathcal{E}_l = \mathcal{E}\,\frac{l\,L\,\omega}{z_1}$$

(Fig. 51), und der Strom $J_w = \frac{\mathcal{E}}{z_1}$ hat die Richtung von $\mathcal{E}_w$. Man trägt demnach $J_a = \mathcal{E}\,l\,A$ in der Richtung von $\mathcal{E}$ und senkrecht dazu in der Richtung der Voreilung $J_c = \mathcal{E}\,l\,C\omega \cdot 10^{-6}$ auf und addiert dazu J_w. Die Resultierende ist J.

55. Messung der Leitungskonstanten. Denken wir uns einen ideellen Leiter, d. h. einen einfachen horizontal ausgespannten Draht (Fig. 52), der die von dem Generator erzeugte Leistung

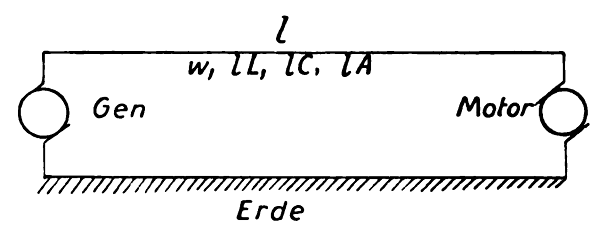


Fig. 52.

zum Verbraucher, z. B. einem Motor hinleitet, so zwar, dass alle durch die Leitung verursachten Verluste ausschliesslich durch ihn bestritten werden. Als Rückleitung sei also eine widerstandslose, kapazitäts- und induktionsfreie Leitung (ideale Erde) angenommen. Die Länge des Leiters sei l [m], sein Widerstand w [Ω], also $\frac{w}{l}$ der Widerstand für 1 m Länge, seine Induktivität L [Henry m^{-1}], seine Kapazität C [Mi m^{-1}] und seine Ableitung A [$\Omega^{-1}\,m^{-1}$]. In dem Felde des Leiters sollen weder ferromagnetische Körper noch andere Leiter vorhanden sein; dielektrische Hysteresisarbeit sei nicht zu leisten. Sind dann $\mathcal{E}_0$ und J_0 die (sinusförmige) Spannung und der Strom des Generators, $\mathcal{E}_1$ und J_1 die entsprechenden Grössen des Motors und $\mathcal{E}$ und J diejenigen in irgend einem Punkt des Leiters, $\dot{\varepsilon} = \dot{\mathcal{E}}_0 - \dot{\mathcal{E}}_1$ der Spannungsabfall in dem Leiter, so gelten ganz allgemein die folgenden beiden Gleichungen:

$$\left.\begin{aligned} -\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} &= J\,\frac{w}{l} + L\,\frac{\partial J}{\partial t} \\ -\frac{\partial J}{\partial x} &= \mathcal{E}\,A + 10^{-6}\,C\,\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (91)$$

die den Verlauf von Spannung und Strom in jedem Punkte der Leitung und

in jedem Augenblick vollständig bestimmen. Für $A = 0$ folgt aus diesen Gleichungen das erweiterte OHMsche Gesetz:

$$\mathfrak{E} = Jw + L\frac{dJ}{dt} + \frac{10^6}{C}\int J\,dt.$$

Es ist bereits erwähnt [49], dass die Gleichungen für die Strom- und Spannungsverteilung symmetrisch belasteter Wechselstrom- und Drehstromleitungen die gleiche Form besitzen, und dass wir daher diese Leitungen ganz wie ideelle Leiter behandeln und die für diese ermittelten Ergebnisse auf sie anwenden dürfen.

Die Gleichungen (91) führen uns nun auf eine einfache Messmethode für die Leitungskonstanten.[1]) $-\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial x}$ ist der Spannungsabfall für die Längeneinheit und $-\frac{\partial J}{\partial x}$ der in jeder Längeneinheit infolge Ableitung und Kondensatorladung nach der Rückleitung übergehende Strom. Wir erhalten also durch Integration über die ganze Länge als Spannungsabfall der ideellen Leitung für den Sonderfall, dass $\frac{\partial J}{\partial x} = 0$ ist:

$$\dot{\mathfrak{E}}_0 - \dot{\mathfrak{E}}_1 = Jw + lL\frac{\partial J}{\partial t} = Jw + jlL\omega J \quad . \quad . \quad . \quad (92)$$

und als Stromabfall für den Sonderfall, dass $\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial x} = 0$ ist:

$$\dot{J}_0 - \dot{J}_1 = \Delta J = \mathfrak{E}lA + 10^{-6}lC\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t} = \mathfrak{E}lA + 10^{-6}jlC\omega\mathfrak{E} \quad . \quad (93)$$

Wir können daher durch folgende drei Messungen die charakteristischen Konstanten der Leitung experimentell bestimmen:

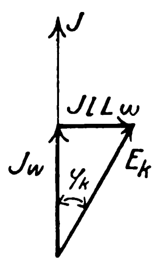


Fig. 53.

1. Durch eine Kurzschlussmessung mittels Wechsel- bezw. Drehstrom den wirksamen Widerstand w und die induktive Reaktanz $x = lL\omega$, entsprechend Gleichung (105), da in diesem Falle wegen der geringen Spannung, die nötig ist, um die normale Betriebsstromstärke J zu erzeugen, sowohl C als A und daher auch ΔJ verschwinden. Ist also E_k diejenige Spannung (bei Drehstrom demnach die verkettete Spannung), die den Strom J hervorbringt, $\cos\varphi_k$ der Leistungsfaktor, so ist bei Wechselstrom (Fig. 53), wenn, wie gewöhnlich, ε den Spannungsabfall in einem (einfachen) Leiter, w dessen Widerstand und l seine Länge bezeichnen:

$$E_k = 2\varepsilon,$$

also:

$$w = \frac{1}{2}\frac{E_k\cos\varphi_k}{J} = \frac{\varepsilon\cos\varphi_k}{J}$$

$$lL\omega = \frac{1}{2}\frac{E_k\sin\varphi_k}{J} = \frac{\varepsilon\sin\varphi_k}{J}$$

$$\operatorname{tg}\varphi_k = \frac{lL\omega}{w}.$$

1) Siehe LEO LICHTENSTEIN: Z. f. E. 1904, S. 443.

Für Drehstrom wird (Fig. 54):

$$E_{21} = E_{13} = E_{32} = E_k$$
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} E_k.$$
$$J_1 = J_2 = J_3 = J.$$

Da die gesamte Leistung des Drehstromsystems

$$\sqrt{3}\, E_k\, J \cos \varphi_k = 3\, \varepsilon\, J \cos \varphi_k = 3\, J^2 w$$

ist, so wird

$$w = \frac{E_k \cos \varphi_k}{\sqrt{3}\, J} = \frac{\varepsilon \cos \varphi_k}{J}$$

$$l\, L\, \omega = \frac{E_k \sin \varphi_k}{\sqrt{3}\, J} = \frac{\varepsilon \sin \varphi_k}{J}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{l\, L\, \omega}{w}.$$

φ_k bedeutet den Winkel zwischen J und $E\sqrt{3}$, also $\sphericalangle (J\varepsilon)$.

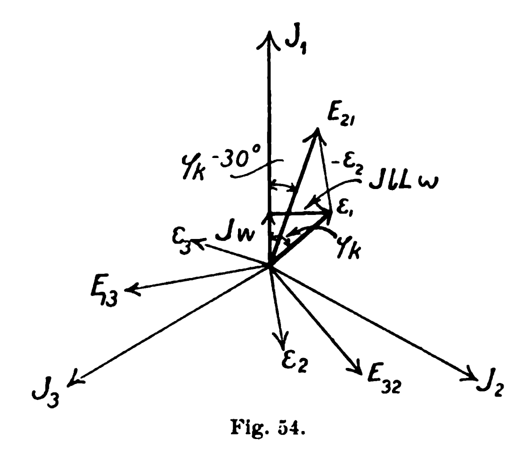


Fig. 54.

Umgekehrt ist der Spannungsabfall in einem Drehstromleiter bei einer Belastung mit J Amp., wenn nur Widerstand und Induktivität vorhanden sind:

$$\varepsilon = J\,(w + j\, l\, L\, \omega) = J z$$

und folglich der gesamte Spannungsabfall am Ende der Leitung:

$$E_k = \sqrt{3}\, \varepsilon = \sqrt{3} \cdot J\,(w + j\, l\, L\, \omega) = \sqrt{3}\, J z,$$

wobei der Winkel arctg $\frac{l\, L\, \omega}{w}$ die Phasenverschiebung zwischen $J\sqrt{3}$ und E_k, d. h. den Winkel $(J\varepsilon)$ darstellt.

2. Durch eine Leerlaufsmessung bei mässiger Spannung die Kapazitätssuszeptanz $10^{-6}\, l\, C\, \omega$ gemäss Gleichung (93), da nunmehr infolge der geringen Ladungsstromstärke einerseits die Wirkung der Induktivität vernachlässigbar klein wird, andererseits wegen der geringen Spannung die Ableitung A

nicht in Frage kommt. Gemessen wird also der Strom J_c und die Spannung E. Bei Wechselstrom-Zweileitern ist der gesamte Ladestrom gemäss Gleichung (65 a)

$$J_c = 10^{-6} l C \omega \frac{E}{2},$$

und bei Drehstrom nach Gleichung (66 a)

$$J_c = 10^{-6} l C \omega \frac{E}{\sqrt{3}},$$

wo entsprechend der Messanordnung E die verkettete Spannung, J_c der (unverkettete) Leitungsstrom ist. Vorausgesetzt ist hierbei, dass die Spannung E und damit auch die Phasenverschiebung (bei Wechselstrom $\sphericalangle (JE) = \sphericalangle (J\varepsilon) = 90^0$, bei Drehstrom $\sphericalangle (J\varepsilon) = 90^0$, also $\sphericalangle (JE) = 120^0$) längs der ganzen

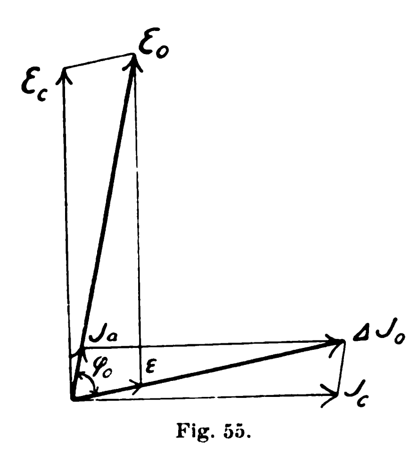


Fig. 55.

Leitung konstant sind, dass also der durch den Strom J_c hervorgerufene Spannungsabfall in den Leitern gegen E nicht in Frage kommt. Daher berechnet sich aus den Daten der Messung die Kapazität für die Längeneinheit des Drahtes zu:

$$C = \frac{Q}{E/2} = 2 \frac{10^6}{l\omega} \frac{J_c}{E} \left[\frac{Mi}{m}\right] \text{ bei Wechselstrom}$$

und

$$C = \frac{Q}{E/\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot \frac{10^6}{l\omega} \frac{J_c}{E} \left[\frac{Mi}{m}\right] \text{ bei Drehstrom.}$$

3. Die dritte Messung, gleichfalls eine Leerlaufsmessung, aber bei der normalen Hochspannung, ergiebt ausser der wirksamen Kapazität C noch die Ableitung für die Längeneinheit A. Beobachtet werden ΔJ_0, E_0 und $\cos \varphi_0$, der stets sehr nahe gleich Null sein wird, da φ_0 wenig von 90^0 abweicht. Von der Spannung $\mathcal{E}_0$ (bei Wechselstrom $= \frac{1}{2} E_0$, bei Drehstrom $= \frac{1}{\sqrt{3}} E_0$) ist abzuziehen (Fig. 55) der durch den Strom ΔJ_0 hervorgerufene Spannungsabfall, der wegen der vorausgesetzten grösseren Bedeutung von J_c und J_a nicht mehr zu vernachlässigen ist, also

$$\varepsilon = \frac{1}{2} w \Delta J_0,$$

der die Richtung von ΔJ_0 besitzt. Der Faktor $\frac{1}{2}$ ist zu der bekannten Formel für ε hinzugefügt worden, weil bei der verteilten Kapazität und Ableitung der Strom von ΔJ_0 am Anfang des Leiters bis Null am Ende desselben abnimmt, also den gleichen Spannungsverlust hervorbringt, als wenn er in voller Grösse auf der Hälfte der Länge abgenommen würde. Die sich aus dieser Konstruktion ergebende Spannung $\mathfrak{E}_c$ ist die mittlere Ladespannung, zu welcher der Ladestrom J_c senkrecht steht (in der Richtung der Voreilung). Die Grössen J_c und J_a werden erhalten, indem durch den Endpunkt von ΔJ_0 Parallelen zu $\mathfrak{E}_0$ und J_0 gelegt werden. Dann ist für Wechselstrom nach Gleichung (65 a) und (71):

$$J_c = 10^{-6} l C \omega \mathfrak{E}, \quad \text{also} \quad C = 2 \frac{10^6}{l\omega} \frac{J_c}{E_c}$$

$$J_a = l A \mathfrak{E}, \quad \text{also} \quad A = \frac{2}{l} \frac{J_a}{E_c}$$

und für Drehstrom nach Gleichung (66 a) und (71):

$$J_c = 10^{-6} l C \omega \mathfrak{E}_c, \quad \text{also} \quad C = \sqrt{3} \frac{10^6}{l\omega} \frac{J_c}{E_c}$$

$$J_a = l A \mathfrak{E}_c, \quad \text{also} \quad A = \frac{\sqrt{3}}{l} \frac{J_a}{E_c}.$$

Offensichtlich entspricht diese Darstellung der Kapazität und Ableitung nur angenähert den wirklichen Verhältnissen, indem anstatt der über die ganze Länge verteilten Grössen eine in der Mitte des Leiters angebrachte äquivalente Kapazität und Ableitung angenommen wurde. Die Betrachtung der verteilten Kapazität und Ableitung würde entsprechend den Gleichungen (91) an jeder Stelle des Kabels eine andere Spannung und einen anderen Strom zu berechnen gestatten, deren graphische Darstellung eine stetige Kurve für jede der beiden Grössen ergeben würde.[1])

56. Strom- und Spannungsverteilung bei Wechselstrom.

Wie bereits erwähnt [49], führt die Aufstellung der Gleichungen für die Strom- und Spannungsverteilung symmetrisch belasteter Wechsel- und Drehstromleitungen auf Formeln, die den für die ideelle Leitung gültigen analog gebaut sind, so dass wir in diesen Fällen die einzelnen Leiter ganz wie ideelle Leiter behandeln können. Ehe wir jedoch auf die Strom- und Spannungsverteilung in solchen mit Induktivität, Kapazität und Ableitung behafteten Kabeln eingehen, soll der einfachere Fall der nur Widerstand bietenden Leitung betrachtet werden.

57. Fortsetzung. Leiter ohne Reaktanz.

Ebenso wie bei Gleichstrom die Nutzwiderstände, können wir bei Wechselstrom die Nutzimpedanzen durch die diesen entsprechenden Spannungen bei Reihenschaltung bezw. Ströme bei Parallelschaltung ersetzen, nur müssen wir entsprechend den beiden Bestandteilen der Impedanzen entweder die beiden Komponenten des Spannungs- bezw. Stromvektors, also die energieverzehrende und die energielose Komponente angeben, oder — wie es in der Praxis geschieht — den Phasenverschiebungswinkel bezw. seinen Cosinus, den sogenannten Leistungsfaktor. Auch hier deuten wir die Phasen-Voreilung

1) Diese graphische Konstruktion siehe bei GALILEO FERRARIS: Wissenschaftliche Grundlagen S. 279 ff. oder bei HERZOG-FELDMANN: Die Berechnung elektrischer Leitungen, Bd. I, S. 310 ff.

oder Nacheilung des die Nutzlast vertretenden (Spannungs- oder Strom-) Vektors gegenüber dem gemeinsamen (Strom- bezw. Spannungs-)Vektor durch Hinzufügung des ersten bezw. vierten Quadrant an, so dass also $\mathcal{E}\,\underline{|37^0}$ bezw. $\mathcal{E}\,\underline{|0{\cdot}80}$ bei Reihenschaltung eine Voreilung der Netzspannung um 37^0 bezw. einen voreilenden Leistungsfaktor von $\cos\varphi = 0{\cdot}80$ bedeutet, und entsprechend bei Parallelschaltung $J\,\underline{37^0|}$ bezw. $J\,\underline{0{\cdot}80|}$ eine Nacheilung des Stromes gegen die gemeinsame Spannung um den gleichen Winkel. In beiden Fällen ist also eine induktive Belastung vorausgesetzt worden; bei Kapazitätsbelastung würden sich die Phasenbezeichnungen umkehren.

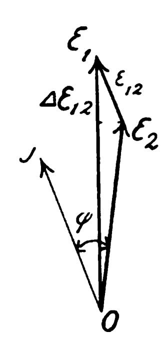


Fig. 56.

Die Strom- und Spannungsverteilung in der Leitung wird nun ermittelt, indem die Teilspannungen, also Spannungsabfall und Nutzspannung, ebenso wie die Teilströme vektoriell zu einander addiert werden. Dabei zeigt es sich nun sofort, dass der **Spannungsabfall** in dem Leiter in Wechselstromkreisen nicht mehr mit dem **Spannungsverlust**, d. h. dem Spannungsunterschied zwischen zwei Punkten $\Delta\mathcal{E}_{12} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ (Fig. 56), zusammenfällt, wenn der Strom eine Phasenverschiebung gegen die Spannung besitzt. Nur in Stromkreisen ohne Phasenverschiebung ist $\Delta\mathcal{E} = \varepsilon$. Für das Funktionieren der Stromverbraucher ist natürlich die Änderung der absoluten Grösse der Spannung, also der Spannungsverlust $\Delta\mathcal{E}$ massgebend. Da diese Grösse stets nur einige Prozent von $\mathcal{E}$ beträgt, so ist sehr nahe $0\,\mathcal{E}_2$ gleich seiner rechtwinkligen Projektion auf $\mathcal{E}_1$ (Fig. 56) und folglich sehr nahe

$$\Delta\mathcal{E}_{12} = \varepsilon_{12}\cos\varphi,$$

wenn

$$\varphi = \sphericalangle(\mathcal{E}_2 J) \div \sphericalangle(\mathcal{E}_1 J)$$

die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bedeutet. **Wir definieren daher für Wechselstromkreise den Spannungsverlust als die energieverzehrende Komponente des Spannungsabfalls**, also

$$\Delta\mathcal{E} = \varepsilon\cos(\mathcal{E}\varepsilon) = \varepsilon_w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (94)$$

Umgekehrt folgt daraus, dass der Spannungsabfall ε in einem Wechselstromleiter im Verhältnis $\frac{1}{\cos(\mathcal{E}\varepsilon)}$ grösser sein darf als der zulässige Spannungsverlust.

Die nachstehenden, auf Einphasen-Wechselstrom bezüglichen Entwickelungen gelten zugleich für Drehstromleitungen, nur wird der gesamte, auf E bezügliche Spannungsabfall, der bei Wechselstrom gleich 2ε ist, bei Drehstrom gleich $\varepsilon\sqrt{3}$. Ferner hat man bei Drehstrom unter i_v stets den Abzweigstrom zu verstehen, der dem auf Stern geschalteten Stromabnehmer entspricht, d. h. wenn i_Δ den Strom eines auf Dreieck geschalteten Abnehmers bedeutet, ist

$$i_v = \sqrt{3}\, i_\Delta;$$

dementsprechend sind auch die Phasenwinkel stets auf die Sternspannung $\mathcal{E}$ zu beziehen.

Wir setzen nunmehr eine Parallelschaltungsanlage nach Fig. 57 voraus mit den Abzweigungen $i_1 \underline{\varphi_1}|$, $i_2 \underline{\varphi_2}|$ und $i_3 \underline{\varphi_3}|$, wo

$$\varphi_\nu = \sphericalangle (\mathfrak{E}_\nu\, i_\nu).$$

Dann wird, wenn $\mathfrak{E}_3$ die Spannung im Punkte 3 ist (Fig. 58)

$$J_{23} = i_3,\ \varepsilon_{23} = J_{23}\, w_{23} \text{ und } \varphi_{23} = \varphi_3;$$

$$J_{12} = i_2 + i_3,\ \varepsilon_{12} = J_{12}\, w_{12}$$

und schliesslich

$$J_{01} = i_1 + i_2 + i_3,\ \varepsilon_{01} = J_{01}\, w_{01};$$

ferner (Fig. 59)

$$\mathfrak{E}_2 = \mathfrak{E}_3 + \varepsilon_{23},\ \mathfrak{E}_1 = \mathfrak{E}_2 + \varepsilon_{12},\ \mathfrak{E} = \mathfrak{E}_1 + \varepsilon_{01}.$$

φ_{12} und φ_{01} sind von φ_2 und φ_1 verschieden, dagegen können behufs Vereinfachung der Konstruktion die Winkel $(\mathfrak{E}_3 i_3)$, $(\mathfrak{E}_2 i_2)$ und $(\mathfrak{E}_1 i_1)$ unbedenk-

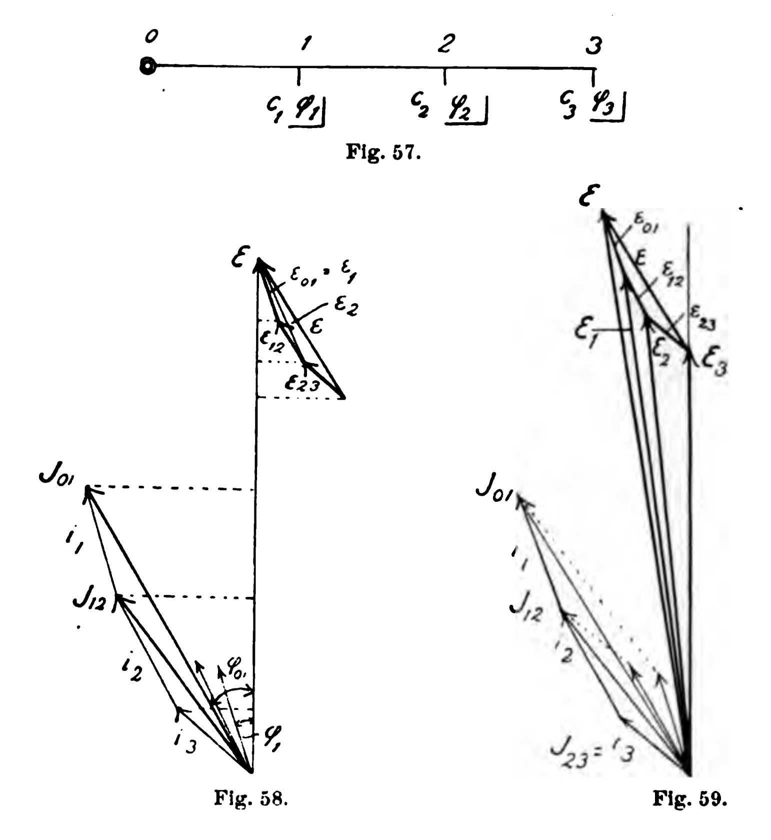


Fig. 57.

Fig. 58.

Fig. 59.

lich den Winkeln $(\mathfrak{E}\, i_3)$ $(\mathfrak{E}\, i_2)$ und $(\mathfrak{E}\, i_1)$ gleich gesetzt werden, da wegen der geringen Grösse der ε der Unterschied der entsprechenden Cosinus in den Grenzen der Genauigkeit, die wir aus den mehrfach erwähnten Gründen anstreben, vernachlässigt werden kann.

Es ist also, wie früher [37]:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{\nu-1,\nu} &= J_{\nu-1,\nu}\, w_{\nu-1,\nu} \\ \varepsilon_\nu &= \sum_1^n \varepsilon_{\nu-1,\nu} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (95)$$

Um nun von den Vektorgleichungen zu arithmetischen Gleichungen zu gelangen, zerlegen wir die Ströme und Spannungsabfälle in ihre Komponenten parallel und senkrecht zu $\mathcal{E}$ und erhalten (Fig. 59):

$$\left.\begin{aligned} J_{\nu-1,\nu} \cos \varphi_{\nu-1,\nu} &= \sum_1^n i_\nu \cos \varphi_\nu \\ J_{\nu-1,\nu} \sin \varphi_{\nu-1,\nu} &= \sum_1^n i_\nu \sin \varphi_\nu \\ \operatorname{tg} \varphi_{\nu-1,\nu} &= \frac{\sum_1^n i_\nu \sin \varphi_\nu}{\sum_1^n i_\nu \cos \varphi_\nu} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (96)$$

ferner:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{\nu-1,\nu} \cos \varphi_{\nu-1,\nu} &= w_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \cos \varphi_{\nu-1,\nu} \\ \varepsilon_{\nu-1,\nu} \sin \varphi_{\nu-1,\nu} &= w_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \sin \varphi_{\nu-1,\nu} \end{aligned}\right\} \quad \ldots (97)$$

mithin:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_\nu \cos(\mathcal{E}\varepsilon_\nu) &= \varepsilon_{\nu,w} = \sum_1^\nu \varepsilon_{\nu-1,\nu} \cos \varphi_{\nu-1,\nu} = \sum_1^\nu w_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \cos \varphi_{\nu-1,\nu} \\ \varepsilon_\nu \sin(\mathcal{E}\varepsilon_\nu) &= \varepsilon_{\nu,l} = \sum_1^\nu \varepsilon_{\nu-1,\nu} \sin \varphi_{\nu-1,\nu} = \sum_1^\nu w_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \sin \varphi_{\nu-1,\nu} \\ \varepsilon_\nu &= \sqrt{\varepsilon^2_{\nu,w} + \varepsilon^2_{\nu,l}} \\ \operatorname{tg}(\mathcal{E}\varepsilon_\nu) &= \frac{\sum_1^\nu w_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \sin \varphi_{\nu-1,\nu}}{\sum_1^\nu w_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \cos \varphi_{\nu-1,\nu}} \end{aligned}\right\} \text{(XIIIa)}$$

Im besonderen ist der maximale Spannungsabfall:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= \sqrt{\varepsilon_w^2 + \varepsilon_l^2} \\ \text{wenn:} \quad \varepsilon_w &= \sum_1^n w_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \cos \varphi_{\nu-1,\nu} \\ \varepsilon_l &= \sum_1^n w_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \sin \varphi_{\nu-1,\nu} \\ \operatorname{tg}(\mathcal{E}\varepsilon) &= \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_w} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \text{(XIII)}$$

Mittels ähnlichen Umformungen, wie in [37] erhält man aus den letzten Gleichungen auch die folgenden:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_w &= \sum_1^n w_\nu\, i_\nu \cos \varphi_\nu \\ \varepsilon_l &= \sum_1^n w_\nu\, i_\nu \sin \varphi_\nu \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \text{(XIV)}$$

Wir sehen also, dass die phasenverschobenen Wechselströme in zwei getrennte Stromverteilungen aufgelöst werden können, von denen die eine in der Richtung der Spannung, die andere senkrecht dazu liegt. Jede dieser

Belastungen bringt unabhängig von der anderen phasengleiche Spannungsverluste hervor, die sich vektoriell superponieren.[1])

58. Querschnittsberechnung bei Leitern ohne Reaktanz.

Bezüglich der Berechnung der Querschnitte $q_{\nu-1,\nu}$ aus den Gleichungen (97) bis (XIV) gelten die gleichen Überlegungen, wie die in den Abschnitten [37] ff. ausgeführten, und zwar folgt für konstanten Querschnitt, wenn ε_w der maximal zulässige Spannungsverlust, der in einem Leiter auftretende Spannungsabfall also $\varepsilon = \frac{\varepsilon_w}{\cos(\mathfrak{E}i)}$ gesetzt wird:

$$q = \frac{\varrho}{\varepsilon_w} \sum_1^n l_\nu\, i_\nu \cos\varphi_\nu = \frac{\varrho}{\varepsilon_w} \sum_1^n l_{\nu-1,\nu}\, J_{\nu-1,\nu} \cos\varphi_{\nu-1,\nu} \quad . \quad . \quad (XV)$$

Also der konstante Querschnitt wird nur durch die energieverzehrenden Komponenten der Ströme und Spannungsabfälle in den Leitungen bestimmt, so lange die Feuersicherheit, für welche natürlich die vollen Stromstärken in Betracht kommen, nicht grössere Querschnitte nötig macht.

In ähnlicher Weise wird für konstante Stromdichte der Querschnitt erhalten zu:

$$q_{\nu-1,\nu} = \frac{J_{\nu-1,\nu} \cos\varphi_{\nu-1,\nu}}{j_w} = \frac{\varrho}{\varepsilon_w}\, l_n\, J_{\nu-1,\nu} \cos\varphi_{\nu-1,\nu} \qquad (XVI)$$

wenn

$$j_w = \frac{J_{\nu-1,\nu} \cos\varphi_{\nu-1,\nu}}{q_{\nu-1,\nu}} = \frac{\varepsilon_w}{\varrho\, l_n} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XVII)$$

die energieverzehrende Komponente der konstanten Stromdichte bedeutet. Ferner erhält man den auf Grund des geringsten Kupfervolumens berechneten Querschnitt als

$$q_{\nu-1,\nu} = \left(\frac{\varrho}{\varepsilon_w} \sum_1^n l_{\nu-1,\nu} \sqrt{J_{\nu-1,\nu} \cos\varphi_{\nu-1,\nu}}\right) \sqrt{J_{\nu-1,\nu} \cos\varphi_{\nu-1,\nu}} \; (XVIII)$$

Fig. 60.

Beispiel.

Wir legen der Rechnung ein ähnliches Beispiel zu Grunde, wie das früher auf S. 42 behandelte, und zwar soll die Leitung auf konstanten Querschnitt berechnet werden. Es ist also $E = 120$ Volt und $2\,\varepsilon_w = 0{\cdot}02\,E = 2{\cdot}4$ Volt. Die bei 1 und 4 abgezweigten Ströme (Fig. 60) sollen eine Phasennacheilung von 37° bezw. 46° besitzen. Dann ist:

$$\begin{aligned} \sum_1^n l_\nu\, i_\nu \cos\varphi_\nu &= 25 \cdot 20 \cdot 0{\cdot}8 = 400 \\ &+ 50 \cdot 5 \cdot 1 = 250 \\ &+ 55 \cdot 40 \cdot 1 = 2200 \\ &+ 155 \cdot 10 \cdot 0{\cdot}7 = 1085 \\ &\qquad\qquad 3935 \end{aligned}$$

1) Herzog-Feldmann, Über Stromverteilung in Wechselstromnetzen, ETZ 1899. S. 780.

also wird

$$q = \frac{0{\cdot}018}{1{\cdot}2} \cdot 3935 = 59{\cdot}0 \text{ mm}^2,$$

d. h. um etwa 12% kleiner als der auf S. 44 berechnete Querschnitt. Dies hat seinen Grund darin, dass infolge der Phasenverschiebung der bei 1 und 4 abgezweigten Ströme die Leitung hier weniger Energie führt als früher. Soll dagegen die Leitung die gleiche Energie führen, so müssten im Punkte 1 $i_1 = \frac{20}{0{\cdot}8} = 25$ und im Punkte 4 $i_4 = \frac{10}{0{\cdot}7} = 14{\cdot}3$ Amp. (die eingeklammerten Werte der Figur) abgezweigt werden. Dann wird der gleiche Querschnitt wie bei dem Beispiel auf S. 44 erhalten, nämlich 67·5 mm².

Wäre umgekehrt für den letzten Fall die Leitung mit dem Querschnitt 67·5 auf Spannungsverlust zu kontrollieren, so wäre:

ν	$i_\nu \cos\varphi_\nu$	$J_{\nu-1,\nu} \cos\varphi_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}$	$i_\nu \sin\varphi_\nu$	$J_{\nu-1,\nu} \sin\varphi_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}$
1	20	75 · 25 = 1875	15	25·2 · 25 = 630
2	5	55 · 25 = 1375	0	10·2 · 25 = 255
3	40	50 · 5 = 250	0	10·2 · 5 = 51
4	10	10 · 100 = 1000	10·2	10·2 · 100 = 1020
		4500		1956

Daher wird

$$\varepsilon_w = \frac{0{\cdot}018}{67{\cdot}5}\, 4500 = 1{\cdot}2\,; \quad \varepsilon_l = \frac{0{\cdot}018}{67{\cdot}5} \cdot 1956 = 0{\cdot}52\,; \quad \varepsilon = 1{\cdot}31.$$

Ferner ist nach Fig. 59 $\mathcal{E}^2 = (\mathcal{E}_4 + \varepsilon_w)^2 + \varepsilon_l^2 = 61{\cdot}2^2 + 0{\cdot}52^2$, also $\mathcal{E} = 61{\cdot}2$, wenn $\mathcal{E}_4 = 60$ gesetzt wird. Daher wird $\Delta\,\mathcal{E} = \mathcal{E} - \mathcal{E}_4 = 1{\cdot}2 = 0{\cdot}02\,\mathcal{E}$.

59. Strom- und Spannungsverteilung bei Leitern mit Reaktanz.

Die allgemeinen Gleichungen (91) [55] für Leitungen mit verteilter Kapazität und Induktivität haben als Lösungen sehr komplizierte Ausdrücke[1] (s. weiter unten), die sich zur praktischen Rechnung nicht eignen. Eine wesentliche Vereinfachung der Lösungen erzielt man jedoch, wenn man die verteilte Kapazität, Ableitung und Induktivität durch die entsprechenden an einer Stelle konzentrierten äquivalenten Grössen ersetzt und die übrige Leitung als kapazitäts- und induktionsfrei behandelt. Als die grösste Leitungslänge, für die diese Vereinfachung gestattet ist, ohne dass sich die neuen Verhältnisse von den thatsächlichen bei verteiltem L, C und A zu sehr entfernen, gilt $\frac{1}{16}$ der elektrischen Wellenlänge λ. Diese ergiebt sich aus der Gleichung

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha}$$

wo

$$\alpha^2 = \frac{1}{2}\sqrt{[w^2 + (l L \omega)^2]\,[(l A)^2 + (l C \omega 10^{-6})^2]} + \frac{1}{2}\,(l^2 L C \omega^2 10^{-6} - l A w)$$

oder wenn $A = o$ und w klein gegen $l L \omega$

$$\alpha = l\omega \sqrt{L C 10^{-6}}.$$

---

1) Ad. Franke, Die elektrischen Vorgänge in Fernsprechleitungen und Apparaten, ETZ 1891, S. 447, sowie auch die Arbeiten von Breisig, ETZ 1895, S. 164; 1899, S. 192; 1900, S. 87; Kennelly, El. World 1894, Bd. 23, S. 17; Herzog-Feldmann, Elektrische Leitungsnetze.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung ist dann

$$v = \lambda p = \frac{\omega}{\alpha}$$

oder für $A = o$, w klein gegen $lL\omega$

$$v = \frac{1}{l\sqrt{LC\,10^{-9}}}.$$

Da nun λ unter den praktischen Verhältnissen, d. h. bei Kupferfreileitungen von 4 bis etwa 10 mm, die 50 bis 200 cm voneinander entfernt sind, und bei Frequenzen unter 100, stets grösser als 1600 km ist, so ist also die oben erwähnte grösste der Vereinfachung zugängliche Leitungslänge etwa 100 km. Bei noch längeren Leitungen verfährt man, gleichfalls mit ausreichender Genauigkeit, in der Weise, dass man etwa alle 100 km die entsprechende, die verteilten Grössen ersetzende Kapazität und Ableitung in Parallelschaltung, den Widerstand und die Induktivität in Reihenschaltung anbringt.

Die Lösung[1]) der beiden Gleichungen (91) sind nach OLIVER HEAVISIDE:

$$\dot{\mathfrak{E}}_0 = \dot{\mathfrak{E}} \cos \text{hyp} \sqrt{Z Y_c} + \dot{J} \sqrt{\frac{Z}{Y_c}} \sin \text{hyp} \sqrt{Z Y_c}$$
$$= \dot{\mathfrak{E}} \cos j \sqrt{Z Y_c} + \dot{J} \sqrt{\frac{Z}{Y_c}} \sin j \sqrt{Z Y_c}$$
$$\dot{J}_0 = \dot{J} \cos \text{hyp} \sqrt{Z Y_c} + \dot{\mathfrak{E}} \sqrt{\frac{Z}{Y_c}} \sin \text{hyp} \sqrt{Z Y_c}$$
$$= \dot{J} \cos j \sqrt{Z Y_c} + \dot{\mathfrak{E}} \sqrt{\frac{Z}{Y_c}} \sin j \sqrt{Z Y_c}$$

wo $Z = w + jlL\omega$ die Impedanz des Leiters von der Länge l und $Y_c = lA + jlC\omega^{-6}$ die Suszeptanz des dem Leiter äquivalenten Kondensators, $\dot{\mathfrak{E}}_0$ und $\dot{J}_0$ Spannung (gegen Null) und Strom am Anfang, $\dot{\mathfrak{E}}$ und $\dot{J}$ die entsprechenden Grössen am Ende der Linie bezeichnen. Ferner ist $j = \sqrt{-1}$.

Die hyperbolischen Funktionen lassen sich nun in Reihen entwickeln und geben dann:

$$\dot{\mathfrak{E}}_0 = \dot{\mathfrak{E}}\left(1 + \frac{Z Y_c}{2!} + \frac{Z^2 Y_c^2}{4!} + \cdots\right) + \dot{J} Z \left(1 + \frac{Z Y_c}{3!} + \frac{Z^2 Y_c^2}{5!} + \cdots\right)$$
$$\dot{J}_0 = \dot{J}\left(1 + \frac{Z Y_c}{2!} + \frac{Z^2 Y_c^2}{4!} + \cdots\right) + \dot{\mathfrak{E}} Y_c \left(1 + \frac{Z Y_c}{3!} + \frac{Z^2 Y_c^2}{5!} + \cdots\right)$$

Man erhält daher in erster Annäherung die bereits im Abschnitt [55] abgeleiteten Lösungen:

$$\left.\begin{aligned} \dot{\mathfrak{E}}_0 &= \dot{\mathfrak{E}} + \dot{J} Z \\ \dot{J}_0 &= \dot{J} + \dot{\mathfrak{E}} Y_c \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (98)$$

und als zweite Annäherung, wenn $\frac{Z Y_c}{2}$ und $\frac{Z Y_c}{6}$ nicht mehr gegen 1 vernachlässigt werden dürfen:

$$\left.\begin{aligned} \dot{\mathfrak{E}}_0 &= \dot{\mathfrak{E}}\left(1 + \frac{Z Y_c}{2}\right) + \dot{J} Z \left(1 + \frac{Z Y_c}{6}\right) \\ \dot{J}_0 &= \dot{J}\left(1 + \frac{Z Y_c}{2}\right) + \dot{\mathfrak{E}} Y_c \left(1 + \frac{Z Y_c}{6}\right) \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (99)$$

1) S. HERZOG-FELDMANN, Elektrische Leitungsnetze, Bd. 2, S. 365.

Von den beiden Gleichungen (98) giebt die erste bei bekanntem $\mathfrak{E}$ und J die Anfangsspannung $\mathfrak{E}_0$, falls der äquivalente Kondensator am Anfang der Linie (Fig. 61), die zweite dagegen den Strom J_0, falls der äquivalente Kondensator am Ende der Linie (Fig. 62) angeordnet ist. Berechnet man für jeden dieser beiden Fälle $\mathfrak{E}_0$ und J_0 und bildet aus den beiden

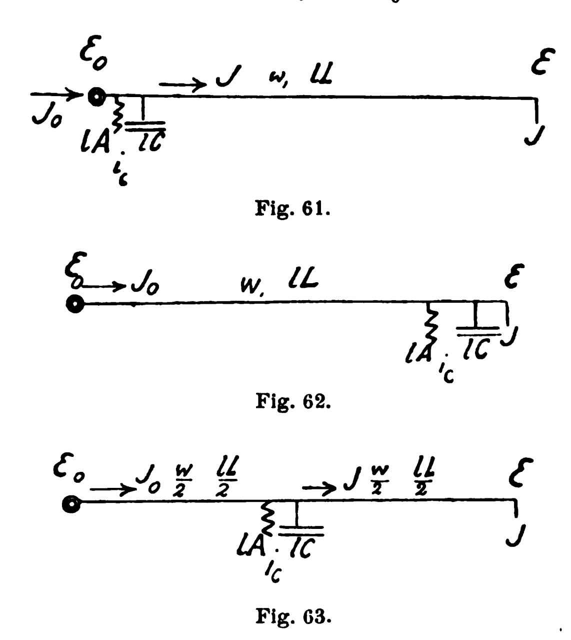


Fig. 61.

Fig. 62.

Fig. 63.

$\mathfrak{E}_0$ und J_0 das Mittel, so entsprechen diese Mittelwerte dem Fall, dass der äquivalente Kondensator ungefähr in der Mitte der Linie angeordnet ist. Man erhält dann nach Fig. 61:

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{E}_0 &= \mathfrak{E} + JZ \\ J_0 &= J + i_c = J + \mathfrak{E}_0 Y_c = J\,(1 + Z Y_c) + \mathfrak{E}\, Y_c \end{aligned}\right\} . \quad (100)$$

und nach Fig. 62:

$$\left.\begin{aligned} J_0 &= J + i_c = J + \mathfrak{E}\, Y_c \\ \mathfrak{E}_0 &= \mathfrak{E} + J_0 Z = \mathfrak{E}\,(1 + Z Y_c) + JZ \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad (101)$$

Die Mittelwerte aus Gleichung (100) und (101) sind also:

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{E}_0 &= \mathfrak{E}\left(1 + \frac{Z Y_c}{2}\right) + JZ \\ J_0 &= J\left(1 + \frac{Z Y_c}{2}\right) + \mathfrak{E}\, Y_c \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (102)$$

Diese Mittelwerte sind mit den in den Gleichungen (99) dargestellten Werten bis auf das Glied $\frac{Z Y_c}{6}$ identisch, stehen also bezüglich der Genauigkeit zwischen den Werten der Gleichungen (98) und (99).

Man würde ebenso zur Berechnung der Strom- und Spannungsverteilung gelangen, wenn man nach Fig. 63 den Kondensator in der Mitte der Leitung

anordnete, den Energieverbraucher durch die äquivalente Impedanz $\frac{\mathfrak{E}}{J}$ ersetzte und nun die gesamte Impedanz des Stromkreises nach [54] berechnete. Diese Rechnungen sind jedoch komplizierter, als die durch die Gleichungen (98), (102) und (99) bedingten, so dass diese vorzuziehen sind.

60. Querschnittsberechnung langer Leitungen.

Aus den Gleichungen (98), (102) und (99) ergiebt sich der Spannungsabfall des Leiters $\varepsilon = \mathfrak{E}_0 - \mathfrak{E}$ mit steigender Genauigkeit zu

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= JZ \\ \varepsilon &= JZ + \mathfrak{E}\,\frac{ZY_c}{2} \\ \varepsilon &= JZ\left(1 + \frac{ZY_c}{6}\right) + \mathfrak{E}\,\frac{ZY_c}{2} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (103)$$

Benutzen wir die erste einfachste Formel zur Querschnittsberechnung, so erhalten wir zunächst bei gegebener Endspannung $\mathfrak{E}$ und bekanntem Belastungsstrom J als Anfangsspannung

$$\mathfrak{E}_0 = \mathfrak{E} + \varepsilon = \mathfrak{E} + J(w + jlL\omega).$$

$\mathfrak{E}_0$ wird also graphisch erhalten, indem (Fig. 64) Jw in der Richtung von J, $JlL\omega$ senkrecht dazu in der Richtung der Voreilung aufgetragen und ε als Resultierende beider vektoriell zu $\mathfrak{E}$ addiert wird. Wie früher [57] ist $\sphericalangle(\mathfrak{E}J) \doteq (\mathfrak{E}_0 J)$ und der Spannungsverlust $\Delta\mathfrak{E} = \mathfrak{E}_0 - \mathfrak{E}_1 = \varepsilon_w = \varepsilon\cos(\mathfrak{E}\varepsilon)$ zu setzen, da auch hier, wegen der im Verhältnis zu $\mathfrak{E}$ bezw. $\mathfrak{E}_0$ stets geringen Grösse von ε, $\mathfrak{E}$ sehr nahe gleich seiner rechtwinkligen Projektion auf $\mathfrak{E}_0$ ist. Ein wesentlicher Unterschied gegen früher springt jedoch sofort ins Auge: Die Reaktanz vergrössert den Spannungsabfall und den Spannungsverlust, verkleinert dagegen den energielosen Betrag des Spannungsabfalls. Nach Fig. 64 ist:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_w &= \varepsilon\cos(\mathfrak{E}\varepsilon) = Jw\cos\varphi + JlL\omega\sin\varphi \\ \varepsilon_l &= \varepsilon\sin(\mathfrak{E}\varepsilon) = JlL\omega\cos\varphi - Jw\sin\varphi \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (104)$$

Dasselbe ergiebt die Rechnung, wenn wir J und ε in komplexer Form schreiben. Wie Fig. 64 zeigt, wird dann

$$\begin{aligned} \varepsilon\,[\cos(\mathfrak{E}\varepsilon) + j\sin(\mathfrak{E}\varepsilon)] &= J(\cos\varphi - j\sin\varphi)(w + jlL\omega) \\ &= Jw\cos\varphi + JlL\omega\sin\varphi + j(JlL\omega\cos\varphi - Jw\sin\varphi), \end{aligned}$$

woraus die angegebenen Ausdrücke für ε_w und ε_l folgen. Ferner wird

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= \sqrt{\varepsilon_w^2 + \varepsilon_l^2} \\ \sphericalangle(\mathfrak{E}\varepsilon) &= \varphi + \psi = \varphi + \operatorname{arctg}\frac{lL\omega}{w} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (105)$$

wobei die Winkel φ und ψ mit den entsprechenden Vorzeichen zu versehen sind. In unserem Falle ist φ negativ, ψ positiv und $\sphericalangle(\mathfrak{E}\varepsilon)$ ebenfalls positiv, da $\psi > \varphi$.

Soll nun bei gegebenem $\mathfrak{E}$, J, φ und für einen bestimmten Spannungsverlust ε_w der Leitungsquerschnitt berechnet werden, so schreiben wir zunächst die Gleichungen (104) in folgender Form:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_w &= Jw \cos\varphi \left(1 + \frac{lL\omega}{w} \operatorname{tg}\varphi\right) = Jw \cos\varphi\,(1 + \operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\psi) \\ \varepsilon_l &= Jw \sin\varphi \left(\frac{lL\omega}{w} \cot\varphi - 1\right) = Jw \sin\varphi\,(\cot\varphi \operatorname{tg}\psi - 1) \end{aligned}\right\} \quad (106)$$

Wir erhalten dann:

$$q = \frac{\varrho l}{\varepsilon_w} J \cos\varphi\,(1 + \operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\psi) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (107)$$

Diese Gleichung enthält zwar ausser q noch die Unbekannte ψ, jedoch führt das folgende Näherungsverfahren schnell zum Ziel: Wir nehmen zunächst $\psi = o$, d. h. $L = o$ an und erhalten dann aus Gleichung (107) die bereits bekannte Gleichung (XV) [58]:

$$q = \frac{\varrho}{\varepsilon_w} lJ \cos\varphi.$$

Wird nun die Entfernung der Leiter voneinander D [cm] auf Grund der zu verwendenden Spannung angenommen, so ergiebt Gleichung (61) [49] die Induktivität L, also auch die Reaktanz $x = lL\omega$ und $\operatorname{tg}\psi = \frac{lL\omega}{w}$. Mit diesen Werten wird nun vermittels Gleichung (108) der genauere Querschnitt berechnet und, falls notwendig, die Rechnung wiederholt. Dann wird mit Hilfe der Gleichungen (67) bis (70) [51] die Kapazität ermittelt, während die Ableitung, wenigstens bei Luftlinien, um die es sich bei sehr langen Leitungen und hohen Spannungen ja handelt, fast stets vernachlässigt werden kann. Mit C ist $Y_c = lC\omega\, 10^{-6}$ bekannt, so dass an Hand der Gleichungen (98), (99) und (102) bezw. (103) und (105) die Werte von $\mathcal{E}_0$ und J_0 berechnet und ε_w kontrolliert werden können. Ergiebt diese Prüfung, dass ε_w zu gross ausfällt, so würde q entsprechend vergrössert bezw. D verkleinert werden müssen.

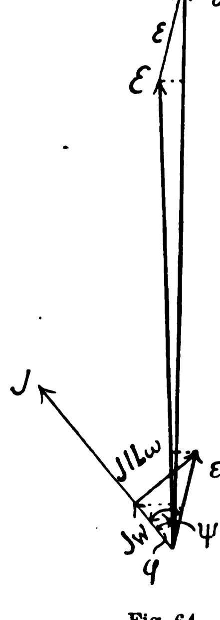


Fig. 64.

Der Energieverlust $\mathfrak{e}$ eines Leiters mit dem Spannungsabfall ε ermittelt sich schliesslich (Fig. 64) zu

$$\mathfrak{e} = \varepsilon J \cos(\varepsilon J) = \varepsilon J \cos\psi = J^2 w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (108)$$

Ist also die Aufgabe gestellt, eine Leitung für einen gegebenen Energieverlust zu berechnen, so ergiebt sich w bezw. q unmittelbar aus Gleichung (108) und es ist dann nach dem Vorhergehenden der Spannungsverlust in der Leitung zu berechnen.

Beispiel.

Es soll eine Nutzleistung von 500 KW bei einem Leistungsfaktor von $\cos\varphi = 0{\cdot}8$ (induktive Belastung) auf 100 km Entfernung mittels einer Kupferleitung übertragen werden. Zur Verwendung gelangt Drehstrom von 20000 Volt Nutzspannung und 50 Perioden in der Sekunde. Die Entfernung der in Form eines gleichseitigen Dreiecks angelegten Leiter voneinander soll 75 cm betragen. Spannung und Strom am Anfang der Leitung soll für einen Spannungsverlust von 10 % berechnet werden.

Wir haben also $E = 20000$, $\mathfrak{E} = \frac{E}{\sqrt{3}} = 11540$, $\varepsilon_w = 1154$ Volt, $\mathfrak{E} = \sqrt{3}\, EJ \cos\varphi = 5 \cdot 10^5$ Watt, folglich $J = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 0{\cdot}8} = 18$ Amp., $l = 10^5$ m, $\omega = 2\pi p = 314$. Nach Gleichung (XV) wird

$$q = \frac{\varrho}{\varepsilon_w}\, lJ \cos\varphi = \frac{0{\cdot}018}{1154} \cdot 10^5 \cdot 18 \cdot 0{\cdot}8 = 22{\cdot}5 \doteq 25 \text{ mm}^2$$

nach Gleichung (61)

$$L = 4{\cdot}606 \left(\log \frac{D}{\sqrt{q}} + 1{\cdot}748\right) 10^{-7} \frac{\text{Henry}}{m}$$

also

$$x = lL\omega = 4{\cdot}606 \cdot 2{\cdot}924 \cdot 314 \cdot 10^{-2} = 42\ \Omega$$

$$w = \frac{0{\cdot}018}{25} \cdot 10^5 = 72\ \Omega$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{42}{72} = 0{\cdot}58.$$

Daher wird nunmehr nach Gleichung (107)

$$q = 22{\cdot}5\,(1 + 0{\cdot}8 \cdot 0{\cdot}58) = 33 \doteq 38{\cdot}5 \text{ mm}^2 \ (d = 0{\cdot}7 \text{ cm}).$$

Die zweite Durchrechnung ergiebt

$$x = 4{\cdot}606 \cdot 2{\cdot}830 \cdot 314 \cdot 10^{-2} = 41{\cdot}0\ \Omega$$

$$w = \frac{0{\cdot}018}{38{\cdot}5} \cdot 10^5 = 46{\cdot}7\ \Omega$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{41{\cdot}0}{46{\cdot}7} = 0{\cdot}88$$

$$q = 22{\cdot}5\,(1 + 0{\cdot}8 \cdot 0{\cdot}88) = 38{\cdot}4,$$

wie vorher.

Wir nehmen also $q = 38{\cdot}5$ mm², entsprechend einem Drahtdurchmesser von 7 mm, an. Hierfür ist $w = 46{\cdot}7\ \Omega$, $x = 41{\cdot}0\ \Omega$, $z = \sqrt{46{\cdot}7^2 + 41{\cdot}0^2} = 62{\cdot}1\ \Omega$, $\operatorname{tg}\psi = 0{\cdot}88$, $\psi = +41^0 20$, $\varphi = -36^0 50$, also $\measuredangle(\mathfrak{E}\varepsilon) = \varphi + \psi = +4^0 30$, d. h. $\varepsilon \llcorner \mathfrak{E}$ entsprechend der Fig. 64 $\cdot \cos(\mathfrak{E}\varepsilon) = 0{\cdot}997$, $\sin(\mathfrak{E}\varepsilon) = 0{\cdot}078$. Ferner nach Gleichung (68) [51]

$$C = \frac{2{\cdot}41 \cdot 10^{-5}}{\log\left(17{\cdot}7 \frac{D}{\sqrt{q}}\right)} = 1{\cdot}033 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Mi}}{m}$$

also, wenn $A = o$ gesetzt wird:

$$Y_c = jlC\omega \cdot 10^{-6} = j\,324 \cdot 10^{-6} = 0{\cdot}324 \cdot 10^{-3}\, e^{j90^0}$$
$$Z = w + jlL\omega = 46{\cdot}7 + j\,41{\cdot}0 = 62{\cdot}1\, e^{j41^0 20},$$

e bedeutet hier wieder die Basis des natürlichen Logarithmensystems.

Ferner ist

$$ZY_c = 62{\cdot}1 \cdot 0{\cdot}324 \cdot 10^{-3}\, e^{j131^0 20} = 20 \cdot 10^{-3}\, e^{j131^0 20} = (-13 + j\,15)\, 10^{-3}$$

$$\frac{1}{2} ZY_c = (-6{\cdot}5 + j\,7{\cdot}5) \cdot 10^{-3} = 10 \cdot 10^{-3}\, e^{j131^0 20}$$

$$\frac{1}{6} ZY_c = (-2 + j\,2{\cdot}5)\, 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3}\, e^{j131^0 20}$$

$$1 + \frac{1}{2} ZY_c = 0{\cdot}994 + j\,7{\cdot}5 \cdot 10^{-3} = 0{\cdot}994\, e^{j0^0 24}$$

$$1 + \frac{1}{6} ZY_c = 0{\cdot}998 + j\,2{\cdot}5 \cdot 10^{-3} = 0{\cdot}998\, e^{j0^0 10}.$$

Also die Korrektionsgrösse $\frac{Z Y_c}{2} \dot{\mathfrak{E}}$ ist ein um $+131^0$ gegen $\dot{\mathfrak{E}}$ verschobener Vektor, dessen Grösse nur etwa $1^0/_0$ von $\mathfrak{E}$ beträgt. Auf den Spannungsverlust wirkt nur die Energiekomponente der Korrektionsgrösse, und zwar im negativen Sinne $(-6{\cdot}5 \cdot 10^{-3})$, d. h. sie verkleinert den Spannungsverlust um $0{\cdot}6^0/_0$ von $\mathfrak{E}$ oder um etwa $6^0/_0$ von ε_w. Die Grössen $\frac{Z Y_c}{6} \dot{J} Z$ und $\frac{Z Y}{6} \dot{\mathfrak{E}} Y_c$ sind gegen 1 völlig zu vernachlässigen, da sie nur $0{\cdot}2^0/_0$ der entsprechenden Vektoren betragen. Demnach berechnen sich Spannung und Strom am Anfang der Linie nach Gleichung (98) zu

$$\begin{aligned}\dot{\mathfrak{E}}^0 = \dot{\mathfrak{E}} + \dot{J} Z &= 11540 + 18\, e^{-j\,36^0\,50} \cdot 62\, e^{j\,41^0\,20} \\ &= 11540 + 1116\, e^{j\,4^0\,30} \\ &= 11540 + 1113 + j\,87 \\ &= 12653 + j\,87 = \mathbf{12653}\, e^{j\,0^0\,24} = \mathbf{12653}\, \underline{|0^0\,24} \text{ (gegen } \mathfrak{E}),\end{aligned}$$

woraus

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\mathfrak{E}}_0 - \dot{\mathfrak{E}} = 1113 + j\,87;\quad \varepsilon_w = 1113 = 0{\cdot}096\ \mathfrak{E}.$$

$$\begin{aligned}\dot{J}_0 = \dot{J} + \dot{\mathfrak{E}} Y_c &= 18\, e^{-j\,36^0\,50} + 11540 \cdot 0{\cdot}324 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j\,90^0} \\ &= 14{\cdot}4 - j\,10{\cdot}8 + j\,3{\cdot}7 \\ &= 14{\cdot}4 - j\,7{\cdot}1 = \mathbf{16{\cdot}0}\, e^{-j\,26^0} = \mathbf{16{\cdot}0}\, \underline{26^0|},\end{aligned}$$

woraus sich $\dot{i}_c = \dot{J}_0 - \dot{J} = j\,3{\cdot}7$, also $3{\cdot}7$ Amp. Ladestrom berechnet, der die Phasennacheilung von 36^0 ($\cos\varphi = 0{\cdot}8$) am Ende auf 26^0 ($\cos\varphi = 0{\cdot}9$) am Anfang der Linie und den Gesamtstrom von 18 auf 16 Amp. verkleinert.

Nach Gleichung (102) ergeben sich die genauen Werte

$$\begin{aligned}\dot{\mathfrak{E}}_0 = \dot{\mathfrak{E}}\left(1 + \frac{Z Y_c}{2}\right) + \dot{J} Z &= 11540 \cdot 0{\cdot}994\, e^{j\,0^0\,24} + 1116\, e^{j\,4^0\,30} \\ &= 11470 + j\,80 + 1113 + j\,87 \\ &= 12583 + j\,167 = \mathbf{12585}\, e^{j\,0^0\,45} = \mathbf{12585}\, \underline{|0^0\,45},\end{aligned}$$

woraus

$$\dot{\varepsilon} = 1043 + j\,167;\quad \varepsilon_w = 1043 = 0{\cdot}090\ \mathfrak{E}.$$

$$\begin{aligned}\dot{J}_0 = \dot{J}\left(1 + \frac{Z Y_c}{2}\right) + \dot{\mathfrak{E}} Y_c &= 18 \cdot e^{-j\,36^0\,50} \cdot 0{\cdot}994\, e^{j\,0^0\,24} + j\,3{\cdot}74 \\ &= 17{\cdot}89\, e^{-j\,36^0\,26} + j\,3{\cdot}74 \\ &= 14{\cdot}40 - j\,10{\cdot}60 + j\,3{\cdot}74 \\ &= 14{\cdot}40 - j\,6{\cdot}86 = \mathbf{15{\cdot}95}\, e^{-j\,25^0\,25} = \mathbf{15{\cdot}95}\, \underline{25^0\,25|},\end{aligned}$$

also $\dot{i}_c = 3{\cdot}74$ Amp.

Die Ergebnisse der ersten gekürzten Rechnung stimmen also für die gewählten Verhältnisse praktisch vollkommen mit denen der genauen Rechnung überein.

Aus $\mathfrak{E}_0$ wird schliesslich E_0 als $\mathfrak{E}_0 \sqrt{3} = 21940$ bezw. 21800 Volt erhalten. Der gesamte Spannungsverlust der Leitung $\varepsilon_w \sqrt{3}$ berechnet sich zu 1930 bezw. 1808 Volt, so dass also in der That am Ende der Leitung 20000 Volt zur Verfügung stehen.

Die geschlossenen Zweileiter-Leitungsnetze.

61. Definitionen.

Wir haben bei den einfachen Gebilden des offenen Leitungsstranges gesehen, dass ein solcher aus zwei gleichen Leitern besteht, zwischen denen einerseits die Energieverbraucher, andererseits der oder die Energieerzeuger liegen. Werden mehrere solcher Leitungen untereinander in der Weise vereinigt, dass zwei gleiche Leitungskomplexe entstehen, die wiederum durch

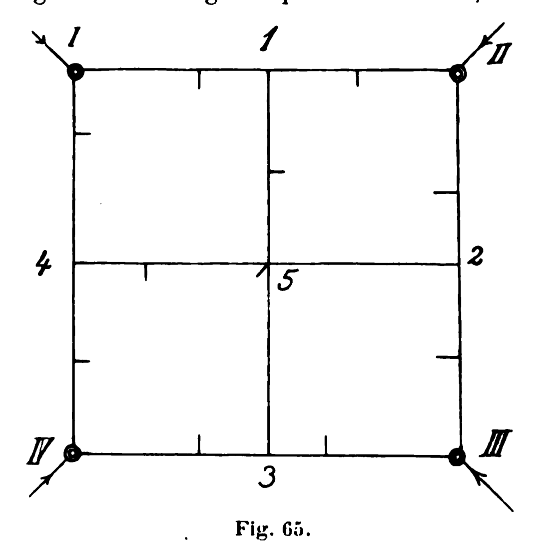


Fig. 65.

die Energieerzeuger und -Verbraucher miteinander verbunden sind, so entsteht ein geschlossenes Leitungsnetz (Fig. 65), wenn die Einzelleiter jeder Netzhälfte so miteinander verbunden sind, dass sie sämtlich oder zum Teil geschlossene Figuren bilden, in denen der Strom jedem Energieverbraucher von zwei oder mehr Seiten her zufliessen kann. Einfache geschlossene Figuren heissen Maschen, zum Unterschiede von denjenigen geschlossenen Kreisen, die sich aus mehreren einfachen Figuren zusammensetzen. Punkte, von denen aus man nach mehr als zwei Richtungen gehen kann, in denen sich also drei oder mehr Leiter vereinigen, heissen Kreuzungspunkte, und zwar Speisepunkte, wenn in ihnen der Energieerzeuger bezw. die ihn ersetzende Speiseleitung angeschlossen ist, Knotenpunkte, wenn dies nicht der Fall ist.

62. Bezeichnungen.

Die Speisepunkte (Fig. 65) sollen mit römischen, die Knotenpunkte mit arabischen Ziffern benannt werden. Die einzelnen Leiter reichen stets von einem Kreuzungspunkt zum andern und werden mit den entsprechenden Endziffern bezeichnet, also Leitung $I1$ oder 15, ihre Widerstände mit w_{I1} bezw. w_{15}, ihre Leitfähigkeiten mit g_{I1} bezw. g_{15}, der in ihnen fliessende Strom mit J_{15}, wenn er von 1 nach 5, mit $J_{51} = - J_{15}$, wenn er von 5 nach 1 fliesst, und der durch den letzteren verursachte Spannungsabfall mit ε_{15} bezw. $\varepsilon_{51} = - \varepsilon_{15}$, und zwar soll $\varepsilon_{15} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_5$, $\varepsilon_{51} = \mathcal{E}_5 - \mathcal{E}_1$ sein, wenn $\mathcal{E}_1$ und $\mathcal{E}_5$ die Potentiale der Punkte 1 und 5, also ihre Spannungen gegen den Nullpunkt des Systems sind. Ferner werden die Stromabnahmen in den Knotenpunkten mit J_1, J_2 . . . und die Spannungsverluste vom Speisepunkte bis zu den Knotenpunkten unter Fortlassung der römischen Ziffern ebenfalls nur mit den entsprechenden arabischen Ziffern bezeichnet, so dass also $\varepsilon_1 = \varepsilon_{I1} = \varepsilon_{II1}$, dagegen $\varepsilon_5 = \varepsilon_1 + \varepsilon_{15} = \varepsilon_2 + \varepsilon_{25} = \ldots$ wird.

Strom- und Spannungsverteilung in geschlossenen Netzen.

63. Der einfache geschlossene Leitungsstrang.

Der einfachste Fall des geschlossenen Leitungsnetzes ist der geschlossene einfache Leitungsstrang mit nur einer Stromzuführung ohne Knotenpunkt (Fig. 66), dessen Stromabnahmestellen sämtlich von zwei Seiten her Strom erhalten können. Die gleiche Stromverteilung ergiebt sich offenbar, wenn man den Strang im Speisepunkte A aufschneidet und die Leitung streckt (Fig. 66a). Die Punkte I und II, die aus dem Punkte A entstanden sind, haben dann naturgemäss gleiches Potential und die Leitung hat nunmehr zwei Speisepunkte. Umgekehrt folgt daraus, dass man einen einfachen Leiter mit zwei Speisepunkten stets als einen geschlossenen Kreis, eine Masche, zu betrachten hat, da man ja räumlich getrennte Punkte gleichen Potentials stets zusammenlegen darf, ohne die Stromverteilung zu ändern.

Wenden wir auf den Stromkreis der Fig. 67 die Kirchhoffschen Sätze an, so folgt sofort, da selbstverständlich

$$J_I + J_{II} = \sum_1^n i_\nu \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (109)$$

sein muss:

$$\left.\begin{array}{l}
J_{I\,1} = J_I = -\left(J_{II} - \sum\limits_n^1 i_\nu\right) \\
J_{1\,2} = J_I - i_1 = -\left(J_{II} - \sum\limits_n^2 i_\nu\right) \\
J_{2\,3} = J_I - \sum\limits_1^2 i_\nu = -\left(J_{II} - \sum\limits_n^3 i_\nu\right) \\
. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\
J_{\nu-1,\nu} = J_I - \sum\limits_1^{\nu-1} i_\nu = -\left(J_{II} - \sum\limits_n^\nu i_\nu\right) \\
J_{n\,II} = -J_{II} = J_I - \sum\limits_1^n i_\nu
\end{array}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (110)$$

und ferner:

$$J_I\, w_{I\,1} + \sum_2^n J_{\nu-1,\nu}\, w_{\nu-1,\nu} - J_{II}\, w_{II\,n} = 0$$

oder wenn wir diese Gleichung vermittelst (110) nach J_{II} entwickeln:

$$i_1 w_{I1} + i_2 w_{I2} + \cdots + i_\nu w_{I\nu} + \cdots + i_n w_{In} - J_{II} w_{III} = 0,$$

d. h. wenn wir den Widerstand der ganzen Linie w_{III} mit w bezeichnen:

$$J_{II} w = \sum_1^n i_\nu w_{I\nu} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (111)$$

Ein Vergleich dieser Gleichung mit (29) [37]

$$\sum_1^n i_\nu w_\nu = (i)\, w$$

zeigt, dass dem ideellen Strom (i), der bei offenen Leitungen den Spannungsverlust ε aufheben würde, hier der dem Speisepunkt II zugeführte reelle

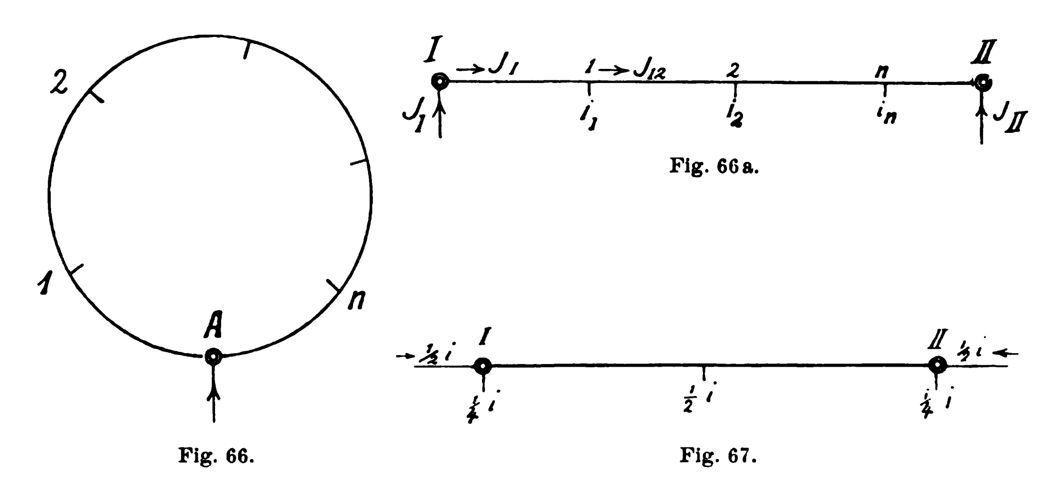


Fig. 66. Fig. 66a. Fig. 67.

Strom J_{II} entspricht, der den Spannungsverlust $\sum_1^n i_\nu w_{I\nu}$ in der geschlossenen Leitung wirklich aufhebt.

Ersetzen wir in Gleichung (111) vermittelst (109) J_{II} durch J_I, so ergiebt sich

$$J_I w = \sum_1^n i_\nu w_{II\nu}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (112)$$

eine Gleichung, die ganz ähnlich gebildet ist, wie die für J_{II}, indem nur die Widerstände $w_{I\nu}$ durch $w_{II\nu} = w - w_{I\nu}$ ersetzt sind, da ja nunmehr entsprechend der Vertauschung von J_I und J_{II} die Widerstände von II nach I hin zählen.

Durch die beiden letzten Gleichungen ist die Stromverteilung und infolgedessen auch die Spannungsverteilung eindeutig bestimmt, wenn die Widerstände und Belastungen des Leitungsstranges gegeben sind. Wir erhalten

$$\left.\begin{aligned} J_I &= \frac{1}{w} \sum_1^n i_\nu w_{II\nu} = g \sum_1^n \frac{i_\nu}{g_{II\nu}} \\ J_{II} &= \frac{1}{w} \sum_1^n i_\nu w_{I\nu} = g \sum_1^n \frac{i_\nu}{g_{I\nu}} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XIX)$$

und mit Hilfe der Gleichungen (110) die Leiterströme. Sind diese positiv, d. h. ist $J_I > \sum_1^{\nu-1} i_\nu$, so fliesst der Strom vom Punkte $\nu - 1$ nach ν und umgekehrt. Im allgemeinen wird also einer bestimmten Abzweigung i_k der Strom von beiden Seiten zufliessen und in diesem Punkte ergiebt sich dann der grösste Spannungsverlust des Stranges. Im besonderen kann auch der Fall eintreten, dass die Abzweigung i_k ganz von I, die Abzweigung i_{k+1} ganz von II gespeist wird. In diesem Falle ist das Leitungsstück k, $k+1$ stromlos und die Spannungsverluste in den Abzweigpunkten k und $k+1$ sind gleich und gleich dem maximalen Spannungsverlust. Dieser berechnet sich in beiden Fällen zu

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon = \varepsilon_m &= J_I\, w_{I\,1} + \sum_2^k J_{\nu-1,\nu}\, w_{\nu-1,\nu} \\ &= J_{II}\, w_{II\,n} + \sum_n^{k+1} J_{\nu,\nu-1}\, w_{\nu,\nu-1} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad \text{(XX)}$$

wo k bestimmt ist durch die Bedingung

$$\sum_1^{k-1} i_\nu < J_I \leq \sum_1^k i_\nu \text{ oder } \sum_n^{k+1} i_\nu \leq J_{II} < \sum_n^k i_\nu.$$

Bezeichnet man den von I der Abzweigung i_k zufliessenden Strom mit $(i_k)_I$, also den von II her zufliessenden Anteil mit $(i_k)_{II}$, so lassen sich die letzten Gleichungen (134) auch schreiben:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= \sum_1^{k-1} i_\nu\, w_{I\nu} + (i_k)_I\, w_{Ik} \\ &= \sum_n^{k+1} i_\nu\, w_{II\nu} + (i_k)_{II}\, w_{IIk} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(XXa)}$$

wie sich leicht ergiebt, wenn für J die aus (110) folgenden Werte eingesetzt werden.

Die letzten Formeln für J und ε vereinfachen sich, wenn der Querschnitt des Leitungsstranges konstant ist. Es ist nach Gleichung (3) [3]

$$w = \frac{\varrho\, l}{q},$$

also wird aus Gleichung (XIX)

$$\left.\begin{aligned} J_I &= \frac{1}{l} \sum_1^n i_\nu\, l_{II\nu} \\ J_{II} &= \frac{1}{l} \sum_1^n i_\nu\, l_{I\nu} \end{aligned}\right| \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(XXI)}$$

und aus Gleichung (XX) und (XXa)

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\varrho}{q} \left(J_I\, l_{I\,1} + \sum_2^k J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}\right) \\ &= \frac{\varrho}{q} \left(J_{II}\, l_{II\,n} + \sum_n^{k+1} J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}\right) \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad \text{(XXII)}$$

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\varrho}{q}\left(\sum_{1}^{k-1} i_\nu\, l_{I\nu} + (i_k)_I\, l_{Ik}\right)\\ &= \frac{\varrho}{q}\left(\sum_{n}^{k+1} i_\nu\, l_{II\nu} + (i_k)_{II}\, l_{IIk}\right)\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad \text{(XXII a)}$$

64. Besondere Fälle der Stromverteilung.

Im besonderen ist bei einer einzigen Abzweigung i in der Mitte des Leiters, wie aus den Gleichungen (XXI) und (XXII) leicht folgt,

$$\left.\begin{aligned}J_I = J_{II} &= \frac{1}{2}\, i\\ \varepsilon &= \frac{1}{4}\,\frac{il}{q}\,\varrho\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad \text{(XXIII)}$$

Der Spannungsverlust — bezw. bei gleichem Spannungsverlust der Querschnitt — ist gegenüber der Stromzuführung von einer Seite auf die Hälfte herabgegangen (Gleichung (I) [3]).

Ist ferner die Belastung i auf die ganze Leiterlänge gleichmässig verteilt, so dass auf jedes Leiterelement die Stromabnahme $di = \frac{i}{l}\, dl$ kommt, so wird wieder:

$$J_I = J_{II} = \frac{1}{2}\, i$$

dagegen

$$\varepsilon = \frac{1}{8}\,\frac{il}{q}\,\varrho \quad \ldots\ldots \quad \text{(XXIV)}$$

denn der Strom in der Entfernung x vom Anfang ist $\frac{1}{2}\, i - \frac{i}{l}\, x$, also der Spannungsverlust im Leiterelement dx:

$$d\varepsilon = J\left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l}\right) dx,$$

woraus ε folgt, wenn von 0 bis $\frac{1}{2}\, l$, dem Punkt des grössten Spannungsverlustes, integriert wird. Hier ist also der Spannungsverlust nur ein Viertel so gross, als wenn unter gleichen Umständen die Stromlieferung nur von einer Seite her erfolgte (Gleichung (XI) [41]). Ohne die Verhältnisse ausserhalb der Strecke $I\, II$ zu ändern, können wir uns, wie die Fig. 67 in Übereinstimmung mit den Gleichungen (XXIII) zeigt, die gleichmässige Belastung von $I\, II$ mit dem Gesamtstrom $i = \int_0^l \frac{i}{l}\, dl$ ersetzt denken durch eine Einzellast von der Grösse $\frac{1}{2}\, i$ in der Mitte der Strecke und durch je eine Stromabnahme von der Grösse $\frac{1}{4}\, i$, die unmittelbar in den Speisepunkten I und II angreifen.

65. Überlagerung der Ströme im geschlossenen Leitungsstrang

Die Gleichungen (XIX) können wir auch in einer Form schreiben, die das Überlagerungsprinzip für Ströme deutlich ausdrückt, nämlich

$$\left.\begin{aligned}J_I &= \sum_{1}^{n} i_\nu\,\frac{w_{II\nu}}{w} = \sum_{1}^{n} i_\nu\,\frac{g}{g_{II\nu}} = \sum_{1}^{n} i_{\nu I}\\ J_{II} &= \sum_{1}^{n} i_\nu\,\frac{w_{I\nu}}{w} = \sum_{1}^{n} i_\nu\,\frac{g}{g_{I\nu}} = \sum_{1}^{n} i_{\nu II}\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (113)$$

wenn

$$\left.\begin{aligned} i_{\nu I} &= i_\nu \frac{w_{II\nu}}{w} = i_\nu \frac{g}{g_{II\nu}} \\ i_{\nu II} &= i_\nu \frac{w_{I\nu}}{w} = i_\nu \frac{g}{g_{I\nu}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (114)$$

die von den Speisepunkten I und II der ν-ten Stromabzweigung zufliessenden Ströme bezeichnen. Hieraus folgt weiter:

$$\frac{i_{\nu I}}{i_{\nu II}} = \frac{w_{II\nu}}{w_{I\nu}} = \frac{g_{I\nu}}{g_{II\nu}} \quad \ldots \ldots \quad (115)$$

d. h. aber: Jede Abzweigung wird unabhängig von den anderen Stromentnahmestellen von beiden Seiten des Leitungsstranges her, und zwar im umgekehrten Verhältnis der den Speisepunkten anliegenden Teilwiderstände oder proportional den anliegenden Teilleitfähigkeiten der Strecke, gespeist. Jede Abzweigung verhält sich demnach, als ob sie allein vorhanden wäre. Die einzelnen Teilströme addieren (superponieren) sich und ergeben die gesamte von jedem Speisepunkte zu liefernde Stromstärke, sowie die in den einzelnen Teilstrecken fliessenden Leiterströme.

Für konstanten Querschnitt erhalten die Gleichungen (114) und (115) wieder die einfachere Form

$$\left.\begin{aligned} i_{\nu I} &= i_\nu \frac{l_{II\nu}}{l} \\ i_{\nu II} &= i_\nu \frac{l_{I\nu}}{l} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (114\,a)$$

$$\frac{i_{\nu I}}{i_{\nu II}} = \frac{l_{II\nu}}{l_{I\nu}} \quad \ldots \ldots \quad (115\,a)$$

66. Querschnittsberechnung des geschlossenen Leitungsstranges. Sollen bei bekannten Belastungen i_ν die Widerstände bezw. die Querschnitte der einzelnen Leitungsstrecken berechnet werden, mit der Bestimmung, dass der maximale Spannungsverlust eine bestimmte Grösse ε nicht überschreiten dürfe, so stehen uns zur Bestimmung der Unbekannten J_I, J_{II} und der $n+1$ Teilwiderstände des Leiters nur die drei Gleichungen (XIX) und (XX) zur Verfügung. Wir dürfen also, wie früher [**38 ff.**], über n Unbekannte noch weitere Annahmen machen, die zur Aufstellung der fehlenden n Gleichungen dienen. Eine eingehende Behandlung dieser Verhältnisse erübrigt sich jedoch an dieser Stelle, da wir uns mit der Bemessung der Querschnitte bei geschlossenen Leitungsnetzen in einem späteren Abschnitt [**109 ff.**] zu beschäftigen haben werden.

In einem Falle jedoch genügen die drei angeführten Gleichungen unmittelbar zur Querschnittsberechnung, nämlich wenn der Leiter konstanten Querschnitt erhält. Die Gleichungen (XXI) geben dann unmittelbar die Stromverteilung und die Gleichungen (XXII) bezw. (XXII a) den Querschnitt.

67. Graphische Darstellung der Strom- und Spannungsverteilung. Zu einer anschaulichen graphischen Darstellung der Stromverteilung in einem geschlossenen Leitungsstrang gelangt man, wenn man die Stromstärken J_I, $J_{12} = J_I - i_1, \cdots J_{II}$ als Ordinaten über dem Widerstand bezw. der Länge des Leitungsstranges (letzteres bei konstantem Querschnitt) als Abscisse aufträgt, und zwar die von I gegen II fliessenden (positiven) Ströme nach oben,

die von *II* gegen *I* fliessenden (negativen) nach unten (Fig. 68). Dem Abzweigungspunkte 2 fliesst, wie ersichtlich, der Strom J_{12} von links, der Strom J_{32} von rechts her zu und ihre Summe ergiebt den abzweigenden Strom i_2.

Auch die das Überlagerungsprinzip darstellenden Gleichungen (113) bis (115) eignen sich vortrefflich zur graphischen Erläuterung der Stromverteilung. Die den einzelnen Abzweigungspunkten von *I* und *II* zufliessenden Teilströme werden über bezw. unter der Horizontalen aufgetragen (Fig. 69); ihre Summe giebt, wie vorher, die endgültige Stromverteilung.

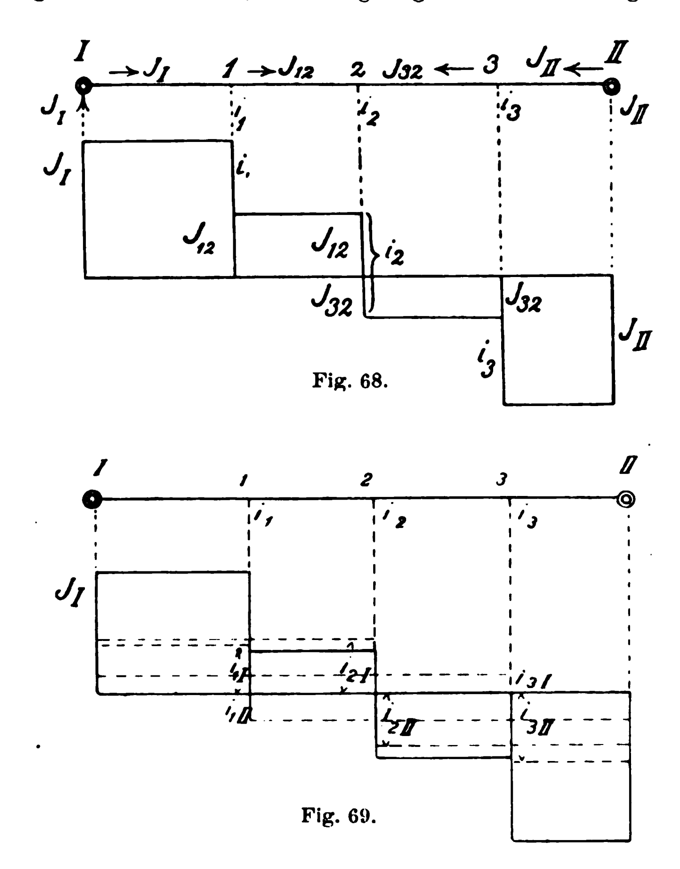


Fig. 68.

Fig. 69.

Der Spannungsabfall in den einzelnen Strecken wird, wie wir früher gesehen haben [37], durch eine gegen die Abscissenachse geneigte Gerade dargestellt. Diese Gerade steigt an, wenn der den Spannungsverlust verursachende Strom positiv ist, im andern Falle fällt sie gegen die Abscissenachse ab. Wenn wir demnach die Teilspannungsverluste $\varepsilon_1 = \varepsilon_{I1}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_{12}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_2 - \varepsilon_{32}$ in den Punkten 1, 2 und 3 als Ordinaten auftragen und die Endpunkte untereinander und mit *I* und *II* verbinden (Fig. 70), so erhalten wir als Darstellung der Spannungsverteilung die gebrochene Linie $I'1'2'3'II'$, deren senkrechte Abstände von der Horizontalen die an jedem Punkte der Strecke herrschenden Spannungsverluste bedeuten. Der grösste Spannungsabfall ε wird bei der Abzweigung 2 erreicht. Bei den Punkten *I* und *II* ist der Spannungsverlust gleich Null, entsprechend der Bedingung, dass in diesen Punkten die Potentiale einander gleich sein sollen.

Auch die graphische Darstellung der Gleichung (111)

$$J_{II}\, w = \sum_{1}^{n} i_v\, w_{Iv}$$

ergiebt die gleiche Verlustkurve (Fig. 71). Die rechte Seite der Gleichung stellt den Spannungsverlust des offenen Leitungsstranges [37] mit I als Speisepunkt, also den Linienzug $I' 1'' 2'' 3'' II''$, die linke Seite den durch den negativen Strom J_{II} hervorgerufenen negativen Spannungsverlust ε_{II}' dar, der daher nach unten aufzutragen ist und die Gerade $I'\, II'''$ ergiebt. Die algebraische Summe beider giebt, wie vorher, die den wirklichen Verhältnissen entsprechende Spannungsverlustkurve $I' 1' 2' 3' II'$. Trägt man dagegen den Spannungsverlust $J_{II}\, w$ positiv auf, verbindet man also I' mit II'', so bezeichnen die Differenzen der Ordinaten des Linienzuges $I' 1'' 2'' 3'' II''$ und der Geraden $I'\, II''$, also die senkrechten Abstände beider Linienzüge, den

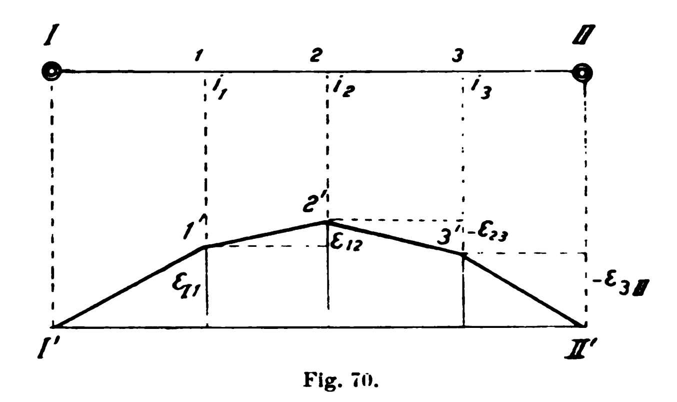


Fig. 70.

an jedem Punkte herrschenden Spannungsabfall. Beide Darstellungen geben das gleiche Ergebnis.

68. Der unvollkommen geschlossene Leitungsstrang. Wir haben die Entstehung des geschlossenen Leitungsstranges ohne Knotenpunkt mit zwei Speisepunkten aus der wirklichen Ring- oder Kreisleitung mit einem Speisepunkte abgeleitet und daraus die Bedingung gewonnen, dass die Speisepunkte gleiches Potential besitzen. Ein solcher Leitungsstrang heisst vollkommen geschlossen, zum Unterschied von dem unvollkommen geschlossenen Leitungsstrang, dessen Speisepunkte aus irgend einem Grunde nicht gleiches Potential besitzen, z. B. weil sie durch zwei Stromquellen ungleicher Spannung E_I und E_{II} gebildet werden (Fig. 72), so dass

$$E_I - E_{II} = 2\,\varepsilon_{III} \gtrless 0.$$

Der unvollkommen geschlossene Leitungsstrang ist also der allgemeinere Fall, der den vollkommen geschlossenen einschliesst und in ihn übergeht, wenn

$$E_I = E_{II}, \text{ also } \varepsilon_{III} = 0.$$

Den unvollkommen geschlossenen Kreis kann man natürlich nicht widerstandslos schliessen, man kann also nicht die Speisepunkte I und II aufeinander legen, ohne die Stromverteilung zu ändern, da ja die dadurch ent-

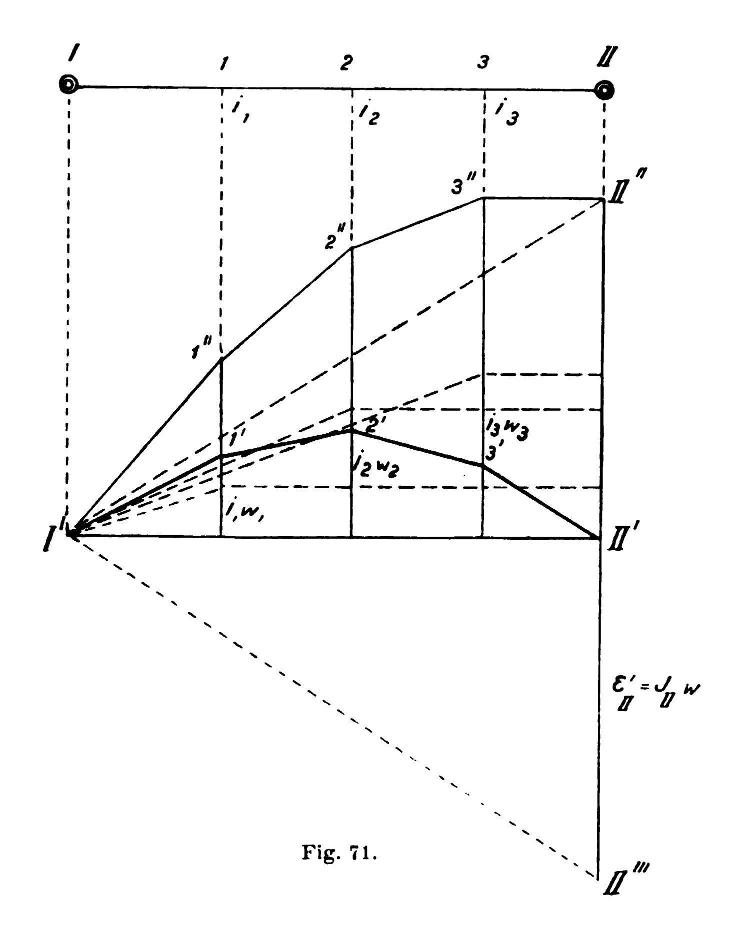


Fig. 71.

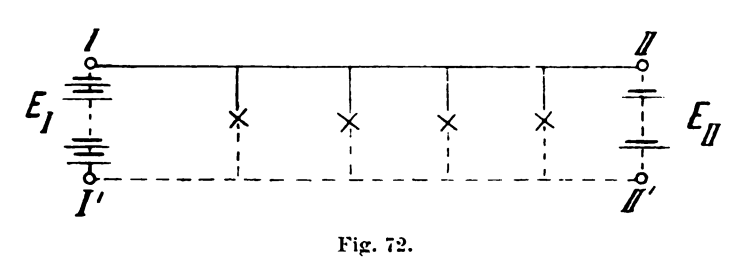


Fig. 72.

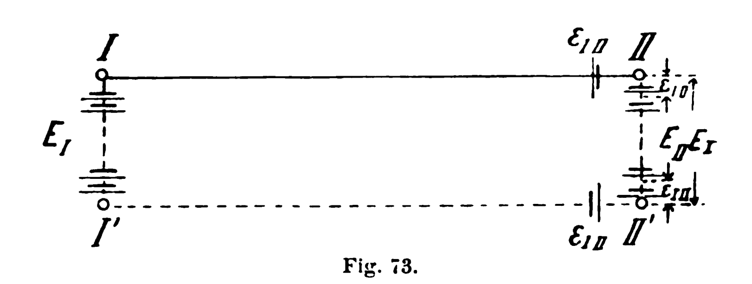


Fig. 73.

stehenden Verhältnisse wegen Nichtberücksichtigung von ε_{III} den thatsächlichen Verhältnissen nicht mehr entsprechen würden. Schalten wir aber in jeden der beiden Leiter $I\ II$ und $I'\ II'$ in irgend einem Punkte die dem Potentialunterschied ε_{III} entsprechende EMK ε_{III} ein und addieren wir gleichzeitig zu E_{II} die EMK — $2\,\varepsilon_{III}$ (Fig. 73) — oder, was dasselbe wäre, subtrahieren wir von E_I die EMK — $2\,\varepsilon_{III}$ —, so ändern wir nichts an der Spannungsverteilung des Stromkreises, da sich ja die beiden EMKe $+ 2\,\varepsilon_{III}$ und $- 2\,\varepsilon_{III}$ aufheben. Dagegen sind jetzt die Potentiale der beiden Speisepunkte einander gleich, nämlich gleich $\mathcal{E}_I$ — bezw. gleich $\mathcal{E}_{II}$ —, und wir können nun die Punkte I und II aufeinander legen. Wir erhalten so die Darstellung der Fig. 74, aus der ersichtlich ist, dass sich über die Stromverteilung, wie sie sich bei gleichen Speisepunktsspannungen ausbilden würde — wir wollen die unter dieser Voraussetzung von I und II gelieferten Teilströme mit J_I' und J_{II}' bezeichnen —, noch ein Strom J_{III} lagert, der durch die EMK ε_{III} im ganzen Widerstande w des Leitungsstranges hervorgerufen wird. Ist, wie in den Fig. 72 bis 74, $\varepsilon_{III} > 0$, also $\mathcal{E}_I > \mathcal{E}_{II}$, so verläuft der Strom J_{III} von I nach II, ist also ebenfalls positiv und verstärkt den Strom J_I', während er den Strom J_{II}' schwächt. Ist $\varepsilon_{III} < 0$, $\mathcal{E}_{II} > \mathcal{E}_I$, so verläuft J_{III} negativ, d. h. von II nach I und verstärkt durch seine Überlagerung den Strom J_{II}', schwächt dagegen den Teilstrom J_I'. Wir können also in beiden Fällen für die wirklich von den Speisepunkten zu liefernden Ströme schreiben:

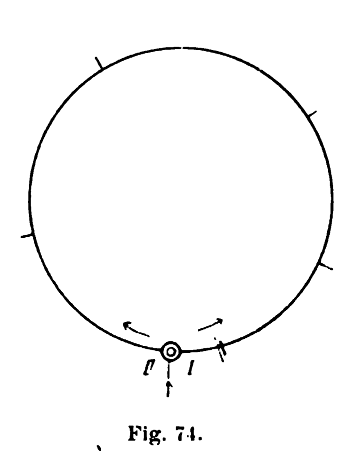


Fig. 74.

$$\left.\begin{aligned} J_I &= J_I' + J_{III} \\ J_{II} &= J_{II}' - J_{III} \\ J_I + J_{II} &= J_I' + J_{II}' = \sum_1^n i_\nu \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (116)$$

wenn

$$J_{III} = \varepsilon_{III}\, g = \frac{\varepsilon_{III}}{w} \text{ und } \varepsilon_{III} = \mathcal{E}_I - \mathcal{E}_{II} \quad \ldots \quad (117)$$

J_I' und J_{II}' werden entsprechend der Voraussetzung gleichen Potentials der Speisepunkte nach Gleichung (XIX) [63] berechnet:

$$\left.\begin{aligned} J_I' &= \frac{1}{w}\sum_1^n i_\nu w_{II\nu} = \sum_1^n i_{\nu I} \\ J_{II}' &= \frac{1}{w}\sum_1^n i_\nu w_{I\nu} = \sum_1^n i_{\nu II} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (118)$$

bezw. bei konstantem Querschnitt nach Gleichung (XXI):

$$\left.\begin{aligned} J_I' &= \frac{1}{l}\sum_1^n i_\nu l_{II\nu} = \sum_1^\nu i_{\nu I} \\ J_{II}' &= \frac{1}{l}\sum_1^n i_\nu l_{I\nu} = \sum_1^\nu i_{\nu II} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (118a)$$

Durch diese Gleichungen ist die Stromverteilung bei bekanntem $\mathcal{E}_I$, $\mathcal{E}_{II}$, i und w bezw. l eindeutig bestimmt.

Für die Spannungsverteilung erhalten wir durch Anwendung des zweiten KIRCHHOFFschen Satzes auf Fig. 74, wie früher [63]:

$$\left.\begin{array}{l} J_I w_{I1} + \sum_2^n J_{\nu-1,\nu} w_{\nu-1,\nu} - J_{II} w_{IIn} = \varepsilon_{III} \\ \text{oder} \\ \sum_1^n i_\nu w_{I\nu} - J_{II} w = \sum_1^n i_\nu w_{II\nu} - J_I w = \varepsilon_{III} \end{array}\right\} \quad \ldots \quad (119)$$

daher

$$\left.\begin{array}{l} \varepsilon = J_I w_{I1} + \sum_2^k J_{\nu-1,\nu} w_{\nu-1,\nu} \\ \quad = J_{II} w_{IIn} + \sum_n^{k+1} J_{\nu,\nu-1} w_{\nu,\nu-1} + \varepsilon_{III} \\ \text{wenn } \mathcal{E}_I > \mathcal{E}_{II} \text{ und} \\ \varepsilon = J_{II} w_{IIn} + \sum_n^{k+1} J_{\nu,\nu-1} w_{\nu,\nu-1} \\ \quad = J_I w_{I1} + \sum_2^k J_{\nu-1,\nu} w_{\nu,\nu-1} + \varepsilon_{III} \\ \text{wenn } \mathcal{E}_{II} > \mathcal{E}_I. \end{array}\right\} \quad \ldots \quad (120)$$

k ist wieder durch die Bedingung bestimmt:

$$\sum_1^{k-1} i_\nu < J_I \leq \sum_1^k i_\nu \quad \text{oder} \quad \sum_1^{k+1} i_\nu \leq J_{II} < \sum_1^k i_\nu.$$

Die Gleichungen (116) bis (120) umfassen auch die Gleichungen (112) bis (XX), da ja ε_{III} und J_{III} für $\mathcal{E}_I = \mathcal{E}_{II}$ verschwinden. Zugleich ist der Fall des ungleichen Potentials zweier Speisepunkte damit auf den bekannten Fall gleichen Potentials zurückgeführt.

Die graphische Darstellung der Ströme und Spannungsverluste nach den Gleichungen (116) und (119) erfolgt genau wie im Abschnitt [66] für äquipotentielle Speisepunkte, nur muss schliesslich zur Stromverteilung der Strom J_{III}, zur Spannungsverteilung die Spannung ε_{III} hinzugefügt werden.

69. Äquipotentielle Verlegung der Belastungen. Die im vorhergehenden Abschnitt mit J_I' und J_{II}' bezeichneten Summen der Teilströme von i_1, i_2 ... [65], die den verschiedenen Abnahmestellen von I bezw. II her zufliessen, können, ohne an der Strom- und Spannungsverteilung etwa sonst noch vorhandener Leitungen etwas zu ändern, auch unmittelbar bei I und II abgezweigt werden, oder anders ausgedrückt: die Belastungsströme können nach den Speisepunkten verlegt werden, ohne dass dadurch die Strom- und Spannungsverhältnisse der Speisepunkte selbst und der übrigen Leitungen geändert würden, kürzer: sie können äquipotentiell nach den Speisepunkten verlegt werden (Fig. 75). Denn der infolge der Potentialdifferenz ε_{III} entstehende Ausgleichstrom J_{III} wird von der Verlegung der Belastungen nicht berührt, bleibt also nach wie vor bestehen; die Summe der Abzweigungen und des Leitungsstromes ergiebt also, wie ein Blick auf Fig. 75 lehrt, nach der Verlegung den gleichen Wert wie vorher. Bleiben aber die Ströme in den übrigen Leitern ungeändert, so bleibt auch das

Potential in I und II das gleiche, auch wenn von der früher gemachten Voraussetzung Abstand genommen wird, dass die Speisepunkte unmittelbar mit Stromquellen unveränderlichen Potentials verbunden sind.

Wir können aber noch weiter gehen und die Belastungen einer oder mehrerer Abzweigungen auf irgend zwei andere Punkte äquipotentiell übertragen[1]) und dadurch die ersteren entlasten. Soll beispielsweise i_2 auf die Punkte 1 und 3 verlegt werden, so ist nach [65] Gleichung (115a) i_2 im

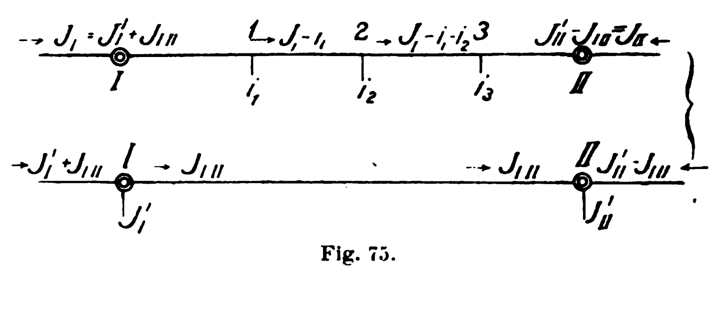


Fig. 75.

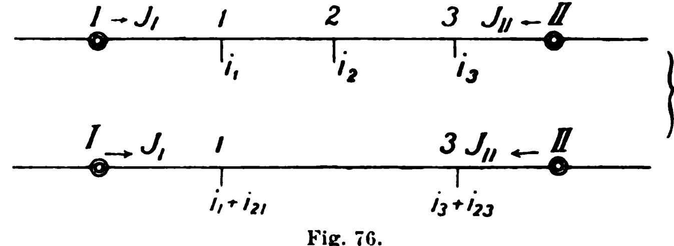


Fig. 76.

umgekehrten Verhältnis der Längen 12 und 23, gleichen Querschnitt des Leitungsstranges vorausgesetzt, zu zerlegen, also

$$\frac{i_{21}}{i_{23}} = \frac{l_{23}}{l_{21}} \quad \text{oder} \quad i_{21} = \frac{l_{23}}{l_{13}}\, i_2, \quad i_{23} = \frac{l_{12}}{l_{13}}\, i_2$$

und i_{21} nach 1, i_{23} nach 3 zu übertragen und zu den dort vorhandenen Strömen zu addieren (Fig. 76). Dann erhalten wir als neue Stromverteilung in I 1 unter Berücksichtigung der Gleichung (115a):

$$\begin{aligned}
&J_{III} + (i_1 + i_{21})\frac{l_{1II}}{l_{III}} + (i_3 + i_{23})\frac{l_{3II}}{l_{III}} \\
&= J_{III} + i_{1I} + \frac{i_2}{l_{III}}\left(l_{1II}\frac{l_{23}}{l_{13}} + l_{3II}\frac{l_{12}}{l_{13}}\right) + i_{3I} \\
&= J_{III} + i_{1I} + i_{2I} + i_{3I} \\
&= J_I' + J_{III} = J_I,
\end{aligned}$$

da ja der Klammerausdruck

$$l_{1II}\frac{l_{23}}{l_{13}} + l_{3II}\frac{l_{12}}{l_{13}} = (l_{12} + l_{2II})\frac{l_{23}}{l_{13}} + (l_{2II} - l_{23})\frac{l_{12}}{l_{13}} = l_{2II}$$

[1]) Vgl. O. Frick: Ein einfaches Verfahren ... Z. f. E. 1894, S. 265.

ist. Die Stromverteilung in $I\,1$ ist also die gleiche geblieben wie vor der Verlegung und ebensowenig ändert sich diejenige in $3\,II$, wie in ähnlicher Weise leicht gezeigt werden kann. Infolgedessen bleiben auch die Potentiale der Punkte 1 und 3 durch die Verlegung unberührt. Dagegen erhält der Strom in der Strecke 1 3 einen anderen Wert wie vorher; es wird

$$J_{13} = J_I - i_1 - i_{21} = J_{III} + i_{23} + i_3 - J_{II}' = -(J_{II} - i_3 - i_{23}) = -J_{31},$$

da ja nach Gleichung (116)

$$J_I = J_I' + J_{III} = J_{III} + \sum_1^n i_\nu - J_{II}'.$$

Die allgemeine Formel für die Stromzerlegung einer Belastung i_k, die auf die Punkte μ und ν $(\mu < k < \nu)$ zu übertragen ist, lautet also:

$$\left.\begin{aligned} i_{k\mu} &= \frac{w_{k\nu}}{w_{\mu\nu}}\, i_k \text{ bezw.} = \frac{l_{k\nu}}{l_{\mu\nu}}\, i_k \\ i_{k\nu} &= \frac{w_{k\mu}}{w_{\mu\nu}}\, i_k \text{ bezw.} = \frac{l_{k\mu}}{l_{\mu\nu}}\, i_k \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad (XXV)$$

Beispiel. Es soll die in Fig. 77 gegebene Stromverteilung auf die Punkte I, 1, 2 und II übertragen und nachgewiesen werden, dass die Potentiale dieser Punkte sich durch die Übertragung nicht ändern.

Die Punkte I und II seien Speisepunkte von gleichem Potential, die Punkte 1 und 2 etwa Strassenkreuzungen, an denen von dem Hauptkabel

Fig. 77.

noch andere Leitungen abzweigen. Die Zahlen an den Leitungen bedeuten, wie gewöhnlich, deren Längen in Metern, diejenigen an den Abzweigungsstrichen Stromstärken in Ampere. Der Querschnitt des Kabels ist überall der gleiche, und zwar gleich 70 mm². Nach Gleichung (XXI) [63] wird vor der Verlegung der Ströme

$$J_I = \frac{1}{l} \sum_1^n i_\nu\, l_{II\nu}; \quad J_{II} = \frac{1}{l} \sum_1^n i_\nu\, l_{I\nu}.$$

Wir erhalten:

$30 \cdot 10 = 300$	$30 \cdot 230 = 6900$
$10 \cdot 50 = 500$	$10 \cdot 190 = 1900$
$40 \cdot 110 = 4400$	$40 \cdot 130 = 5200$
$20 \cdot 180 = 3600$	$20 \cdot 60 = 1200$
$50 \cdot 220 = 11000$	$50 \cdot 20 = 1000$
$19800 : 240$	$16200 : 240$
$J_{II} = 82{\cdot}5$	$J_I = 67{\cdot}5 = \Sigma\, i - J_{II}.$

Ferner wird, da nach Gleichung (XXII)

$$\varepsilon_\nu = \frac{\varrho}{q}\left(J_I\, l_{I\,1} + \sum_2^\nu J_{\nu-1,\nu}\, l_{\nu-1,\nu}\right),$$

67·5 · 10 = 675	82·5 · 20 = 1650
37·5 · 40 = 1500	32·5 · 40 = 1300
27·5 · 30 = 825	12·5 · 20 = 250
3000	3200

$$\varepsilon_1 = \frac{3000 \cdot 0{\cdot}018}{70} = 0{\cdot}772 \qquad \varepsilon_2 = \frac{3200 \cdot 0{\cdot}018}{70} = 0{\cdot}823.$$

Verlegen wir nun die Belastungen auf I, 1, 2 und II, so wird gemäss Gleichung (XXV) der Reihe nach:

	I	1	2	II
$\frac{70}{80} \cdot 30 =$	26·25	3·75	—	—
$\frac{30}{80} \cdot 10 =$	3·75	6·25	—	—
$\frac{50}{80} \cdot 40 =$	—	25·00	15·00	—
$\frac{60}{80} \cdot 20 =$	—	—	15·00	5·00
$\frac{20}{80} \cdot 50 =$	—	—	12·50	37·50
	$i_I = 30{\cdot}00$	$i_1 = 35{\cdot}00$	$i_2 = 42{\cdot}50$	$i_{II} = 42{\cdot}50$

Wir erhalten also als neue Stromverteilung die der Fig. 78 und berechnen daraus die Ströme in den Leitungen zu

$$J_{I\,1} = 37{\cdot}5; \quad J_{1\,2} = 2{\cdot}5; \quad J_{II\,2} = 40{\cdot}0.$$

Daher wird

$$\varepsilon_1 = \frac{37{\cdot}5 \cdot 80}{70} \cdot 0{\cdot}018 = 0{\cdot}772 \quad \text{und} \quad \varepsilon_2 = \frac{40{\cdot}0 \cdot 80}{70} \cdot 0{\cdot}018 = 0{\cdot}823$$

wie oben. Die beiden betrachteten Stromverteilungen sind also in bezug auf die Spannungsverluste bezw. Potentiale von 1 und 2 vollständig gleichwertig.

70. Verlegung der Belastungen und Überlagerung zweier Stromverteilungen.

Wie die Vergleichung der Formeln (XXV) und (114) lehrt, geschieht die äquipotentielle Verlegung der Belastungen genau so, als ob diejenigen Punkte, auf die die Lasten verlegt werden, gleiches Potential besässen. Wir können uns daher die ursprüngliche Stromverteilung der Fig. 79, bei der die Potentiale der Speisepunkte I und II verschieden sein sollen, auch so entstanden denken, dass wir zunächst denjenigen Punkten, auf die die Belastungen verlegt werden sollen — hier I, 2, 4 und II — das gleiche Potential, etwa $\mathcal{E}_I$, erteilen und die Stromverteilung nach Gleichung (114) vornehmen (Fig. 80), ausserdem aber nach dem vorhergehenden Abschnitt die ursprüngliche Spannungsverteilung wieder dadurch hervorrufen, dass wir einerseits die Punkte 2 und 4

mit den ihnen in Fig. 80 zugeführten Strömen belasten,[1]) andererseits den den Spannungsverlust $\varepsilon_{I\,II}$ verursachenden Strom $J_{I\,II} = \varepsilon_{I\,II}\, g_{I\,II}$ in die Leitung einführen (Fig. 81). Aus dieser Stromverteilung werden dann die bei I und II zuzuführenden Ströme J_I'' und I_{II}'' berechnet, so dass die Stromverteilung der Fig. 82 entsteht. Die Überlagerung der beiden Stromvertei-

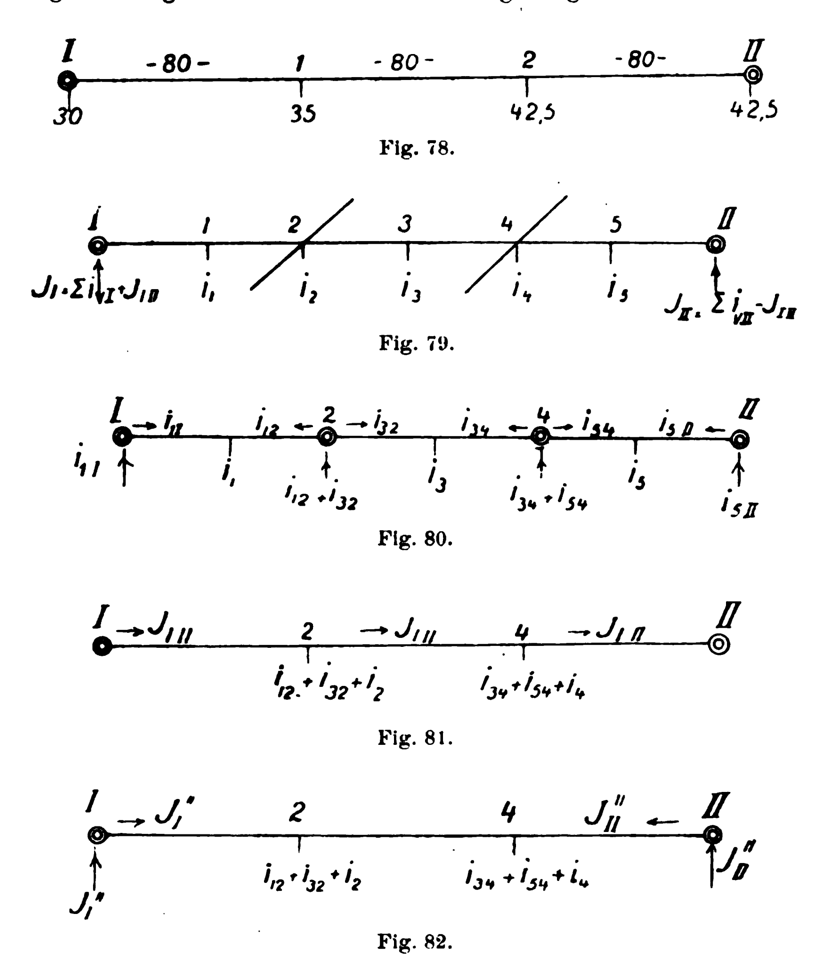


Fig. 78.

Fig. 79.

Fig. 80.

Fig. 81.

Fig. 82.

lungen (Fig. 80 u. 82) giebt offenbar die ursprünglich der Fig. 79, wie aus der Beweisführung in [69] hervorgeht.

Nehmen wir wieder die Stromverteilung der Fig. 79, nur betrage die Potentialdifferenz zwischen I und II 1 Volt. Dann ergiebt sich als Stromverteilung bei gleichen Potentialen in den Punkten I, 1, 2 und II die in Fig. 83 eingezeichnete, während Fig. 84 die der ursprünglichen Spannungsverteilung entsprechende Belastung darstellt, da

Beispiel.

$$\varepsilon_{I\,II}\, g_{I\,II} = 1 \cdot \frac{70}{240 \cdot 0{\cdot}018} = 16{\cdot}2.$$

Es sind also bei I 37·5 + 16·2 = 53·7 und bei II 40·0 — 16·2 = 23·8 Amp.

1) TEICHMÜLLER: Elektrische Leitungsnetze.

zuzuführen und es entsteht die Stromverteilung der Fig. 85, die als Spannungsverluste in 1 und 2

$$\varepsilon_1 = \frac{53{\cdot}7 \cdot 80 \cdot 0{\cdot}018}{70} = 1{\cdot}104;$$

$$\varepsilon_2 = 1{\cdot}104 + \frac{18{\cdot}7 \cdot 80 \cdot 0{\cdot}018}{70} = 1{\cdot}489$$

oder auch

$$= \varepsilon_{I\,II} + \frac{23{\cdot}8 \cdot 80 \cdot 0{\cdot}018}{70} = 1{\cdot}489$$

giebt. Die Überlagerung von Fig. 83 und 85 ist als wahre Stromverteilung in Fig. 86 dargestellt. Der Spannungsverlust in 1 und 2 berechnet sich zu

$$\varepsilon_1 = \frac{0{\cdot}018}{70}(83{\cdot}7 \cdot 10 + 53{\cdot}7 \cdot 40 + 43{\cdot}7 \cdot 30) = 1{\cdot}104$$

$$\varepsilon_2 = 1{\cdot}104 + \frac{0{\cdot}018}{70}(43{\cdot}7 \cdot 30 + 3{\cdot}7 \cdot 50) = 1{\cdot}489$$

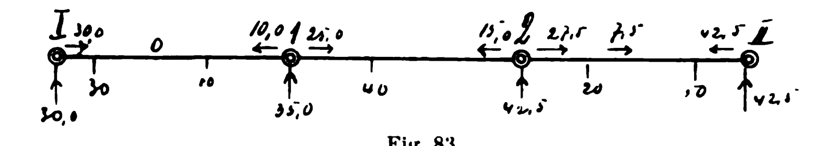


Fig. 83.

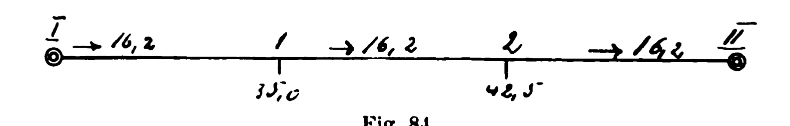


Fig. 84.

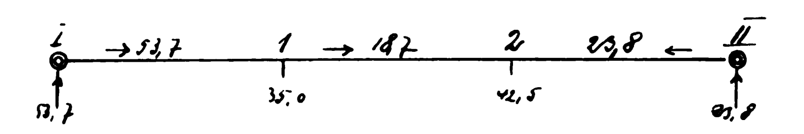


Fig. 85.

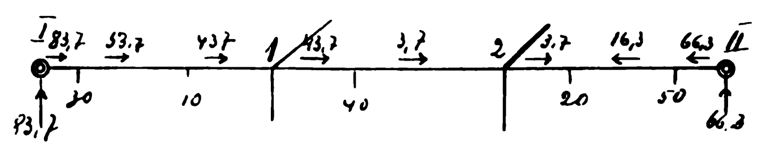


Fig. 86.

wie vorher. Der grösste Spannungsverlust findet bei der Belastung 20 Amp. zwischen 2 und *II* statt und beträgt von *I* aus:

$$\varepsilon_{I_m} = 1{\cdot}489 + \frac{3{\cdot}7 \cdot 20 \cdot 0{\cdot}018}{70} = 1{\cdot}508,$$

von *II* aus:

$$\varepsilon_{II_m} = \frac{0{\cdot}018}{70}(66{\cdot}3 \cdot 20 + 16{\cdot}3 \cdot 40) = 0{\cdot}509.$$

Ihre Differenz und damit auch die Differenz der Potentiale in *I* und *II* beträgt, wie vorausgesetzt, 1 Volt.

71. Das allgemeine Netz mit Knotenpunkten.

Die in dem vorhergehenden Abschnitt behandelte Verlegung der verteilten Belastungen auf bestimmte ausgezeichnete Punkte können wir natürlich auch auf die allgemeinen Netze anwenden und dadurch eine wesentliche Ver-

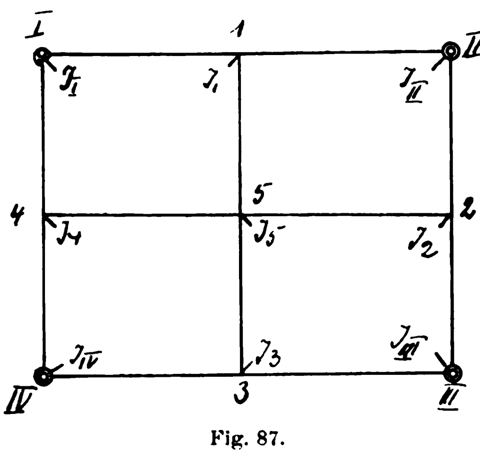


Fig. 87.

einfachung derselben erreichen. Wir haben zu diesem Zwecke also bestimmten Punkten, nämlich den Speise- und Knotenpunkten, zunächst gleiches Potential zu erteilen und die auf den Einzelstrecken verteilten Belastungen äquipotentiell auf sie zu übertragen. Dadurch erhalten wir aus einem allgemeinen Netz nach Fig. 65 [61] ein solches nach Fig. 87, in dem nur die Speise- und Knotenpunkte belastet sind. Unsere nächste Aufgabe ist also, in einem solchen Netz die Strom- und Spannungsverteilung zu bestimmen.

Gleichungsmethoden.

72. Netz mit einem Knotenpunkt.

Wir betrachten zunächst wieder den einfachsten Fall, nämlich ein Netz, das nur einen Knotenpunkt bei mehreren äquipotentiellen Speisepunkten enthält (Fig. 88). Die Berechnung der Strom- und Spannungsverteilung in den

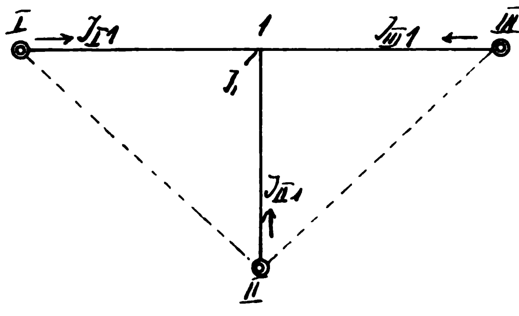


Fig. 88.

Leitungen besteht nun darin, entweder diejenigen Teilströme von J_1 zu bestimmen, welche von jedem Speisepunkte aus dem Knotenpunkt zufliessen (Strommethode), oder den Spannungsverlust ε_1 (Spannungsmethode). Die

Aufgabe kann also in zweifacher Weise gelöst werden; durch jede der beiden Lösungen ist die andere gegeben, da ja

$$\varepsilon_1 = w_{I\,1} J_{I\,1} = w_{II\,1} J_{II\,1} = w_{III\,1} J_{III\,1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (121)$$

und andererseits

$$J_{I\,1} = g_{I\,1}\,\varepsilon_1;\; J_{II\,1} = g_{II\,1}\,\varepsilon_1;\; J_{III\,1} = g_{III\,1}\,\varepsilon_1 \quad . \quad . \quad . \quad (121\text{a})$$

ist. Die Gleichungen, welche die Abhängigkeit der Leiterströme bezw. der Spannungsverluste von den Widerständen oder Leitfähigkeiten darstellen, erhalten wir nun auf folgendem Wege:

73. **Spannungsmethode. (Coltri-Teichmüller.)**

Der erste KIRCHHOFFsche Satz, angewendet auf den Knotenpunkt 1, ergiebt:

$$J_{I\,1} + J_{II\,1} + J_{III\,1} = J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (122)$$

Legen wir ferner die Punkte *I*, *II* und *III* aufeinander **[63]**, bezw. verbinden wir sie durch widerstandslose Leitungen miteinander, so liefert in den so

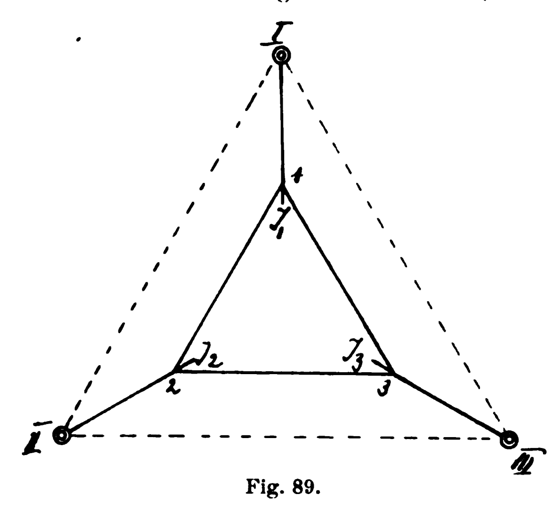


Fig. 89.

entstandenen geschlossenen Kreisen der zweite KIRCHHOFFsche Satz die Gleichungen

$$w_{I\,1} J_{I\,1} = w_{II\,1} J_{II\,1} = w_{III\,1} J_{III\,1} = \varepsilon_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (123)$$

Eliminieren wir aus diesen vier Gleichungen die Ströme $J_{I\,1}$, $J_{II\,1}$ und $J_{III\,1}$ und ersetzen wir die Widerstände durch die Leitfähigkeiten, so folgt:

$$(g_{I\,1} + g_{II\,1} + g_{III\,1})\,\varepsilon_1 = J_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (124)$$

wodurch ε_1 bei gegebenen Leitfähigkeiten und bekannter Belastung, also bei einem vorliegenden Netz, bestimmt ist. Aus ε_1 und den Gleichungen (123) folgt schliesslich die Stromverteilung, d. h. die Werte $J_{I\,1}$, $J_{II\,1}$ und $J_{III\,1}$.

74. **Strommethode. (Schnittmethode von Herzog-Stark.)**

Wir können aber auch von der Einführung des Spannungsverlustes ε_1 absehen und durch Lösung der drei Gleichungen (122) und (123) die Stromverteilung unmittelbar bestimmen. Wir erhalten durch Elimination von $J_{III\,1}$

$$\left.\begin{aligned} w_{I\,1} J_{I\,1} - w_{II\,1} J_{II\,1} &= 0 \\ w_{III\,1} J_{I\,1} + (w_{II\,1} + w_{III\,1})\, J_{II\,1} &= w_{III\,1} J_1 \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad (125)$$

also zwei Gleichungen, aus denen die beiden Unbekannten J_{I1} und J_{II1} und mit Hilfe der Gleichungen (122) auch J_{III1} und ε_1 folgen.

75. Netze mit mehreren Knotenpunkten.

Sind mehrere belastete Knotenpunkte vorhanden (Fig. 89), so ergiebt sich die Aufstellung der Gleichungen in ganz ähnlicher Weise, und wir erhalten so die allgemeine Lösung des Problems der Spannungs- und Stromverteilung in einem geschlossenen Netz mit belasteten Knotenpunkten.

76. Spannungsmethode.

Für die Spannungsverteilung erhalten wir nach dem Vorhergehenden für Knotenpunkt 1:

$$J_{I1} + J_{21} + J_{31} = J_1$$

also

$$g_{I1}\,\varepsilon_1 + g_{12}\,\varepsilon_{21} + g_{31}\,\varepsilon_{31} = J_1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (126)$$

und in dem geschlossenen Kreise $I\,12\,II$

$$w_{I1}\,J_{I1} + w_{12}\,J_{12} + w_{II2}\,J_{2II} = 0$$

oder

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_{12} - \varepsilon_2 = 0,$$

woraus

$$\varepsilon_{12} = -\,\varepsilon_{21} = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$$

und ähnlich

$$\varepsilon_{31} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$$

$$\varepsilon_{23} = \varepsilon_3 - \varepsilon_2,$$

wie überhaupt allgemein

$$\varepsilon_{\mu\nu} = -\,\varepsilon_{\nu\mu} = \varepsilon_\nu - \varepsilon_\mu \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(XXVI)}$$

ist; denn nach der Definition [62] ist

$$\varepsilon_{\mu\nu} = \mathcal{E}_\mu - \mathcal{E}_\nu.$$

Addiert man hierzu die identische Gleichung $\mathcal{E} - \mathcal{E} = 0$, so wird:

$$\varepsilon_{\mu\nu} = (\mathcal{E} - \mathcal{E}_\nu) - (\mathcal{E} - \mathcal{E}_\mu) = \varepsilon_\nu - \varepsilon_\mu.$$

Aus den Gleichungen (126) und (XXVI) erhalten wir nun für Knotenpunkt 1:

$$(g_{I1} + g_{12} + g_{13})\,\varepsilon_1 - g_{12}\,\varepsilon_2 - g_{13}\,\varepsilon_3 = J_1$$

und in gleicher Weise ergeben sich für die andern Knotenpunkte die Gleichungen:

$$-\,g_{21}\,\varepsilon_1 + (g_{II2} + g_{21} + g_{23})\,\varepsilon_2 - g_{23}\,\varepsilon_3 = J_2$$

$$-\,g_{31}\,\varepsilon_1 - g_{32}\,\varepsilon_2 + (g_{III3} + g_{32} + g_{31})\,\varepsilon_3 = J_3,$$

oder wenn wir die Summen der in einem Knotenpunkte ν zusammenlaufenden Leitfähigkeiten mit $g_{\nu\nu}$ bezeichnen, also

$$g_{\nu\nu} = g_{\nu 1} + g_{\nu 2} + \cdots + g_{\nu,\,\nu-1} + g_{\nu,\,\nu+1} + \cdots + g_{\nu n}$$

setzen, so lautet das Gleichungssystem zur Bestimmung der Spannungsverluste ε_ν in den Knotenpunkten:

$$\left.\begin{array}{r} g_{11}\,\varepsilon_1 - g_{12}\,\varepsilon_2 - g_{13}\,\varepsilon_3 = J_1 \\ -g_{21}\,\varepsilon_1 + g_{22}\,\varepsilon_2 - g_{23}\,\varepsilon_3 = J_2 \\ -g_{31}\,\varepsilon_1 - g_{32}\,\varepsilon_2 + g_{33}\,\varepsilon_3 = J_3 \end{array}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (127)$$

und zwar ist $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$.

In den praktischen Netzen sind niemals alle Verbindungen zwischen den einzelnen Knotenpunkten vorhanden, es ist nicht jeder Knotenpunkt mit allen anderen unmittelbar verbunden, sondern nur mit den nächstliegenden, während die direkten Verbindungen mit den anderen Knotenpunkten fehlen, z. B. die Verbindungen 12, 13, 14 u. s. f. in Fig. 87 (S. 107). In diesem Falle ist die der fehlenden Verbindung $\varkappa\lambda$ entsprechende Leitfähigkeit $g_{\varkappa\lambda} = 0$ einzusetzen, da ja der Widerstand $w_{\varkappa\lambda} = \infty$ ist.

Wir haben also entsprechend den drei Knotenpunkten drei unabhängige Gleichungen ersten Grades mit drei Unbekannten, so dass das Problem der Spannungsverteilung in den Knotenpunkten eindeutig gelöst ist.

In der gleichen Form würde sich allgemein das folgende System von n Gleichungen für n belastete Knotenpunkte ergeben:

$$\left.\begin{array}{r} g_{11}\,\varepsilon_1 - g_{12}\,\varepsilon_2 - \cdots - g_{1\nu}\,\varepsilon_\nu - \cdots - g_{1n}\,\varepsilon_n = J_1 \\ -g_{21}\,\varepsilon_1 + g_{22}\,\varepsilon_2 - \cdots - g_{2\nu}\,\varepsilon_\nu - \cdots - g_{2n}\,\varepsilon_n = J_2 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ -g_{\nu 1}\,\varepsilon_1 - g_{\nu 2}\,\varepsilon_2 - \cdots + g_{\nu\nu}\,\varepsilon_\nu - \cdots - g_{\nu n}\,\varepsilon_n = J_\nu \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ -g_{n1}\,\varepsilon_1 - g_{n2}\,\varepsilon_2 - \cdots - g_{n\nu}\,\varepsilon_\nu - \cdots + g_{nn}\,\varepsilon_n = J_n \end{array}\right\} \quad (XXVII)$$

woraus sich der Spannungsverlust im Knotenpunkt ν berechnet zu

$$\varepsilon_\nu = \frac{D_{\nu 1}\,J_1 + D_{\nu 2}\,J_2 + \cdots + D_{\nu n}\,J_n}{D}, \quad . \quad . \quad . \quad (128)$$

wenn unter D die Determinante des Systems und unter $D_{\mu\nu}$ die Unterdeterminante des $\mu\nu^{\text{ten}}$ Gliedes der Determinante verstanden wird, wenn also

$$D = \begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1\nu} & \cdots & -g_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{\nu 1} & -g_{\nu 2} & \cdots & g_{\nu\nu} & \cdots & -g_{\nu n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & -g_{n\nu} & \cdots & g_{nn} \end{vmatrix}$$

$$\text{und} \quad D_{\mu\nu} = (-1)^{\mu+\nu} \begin{vmatrix} g_{11} & \cdots & -g_{1,\nu-1} & -g_{1,\nu+1} & \cdots & -g_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{\mu-1,1} & \cdots & -g_{\mu-1,\nu-1} & -g_{\mu-1,\nu+1} & \cdots & -g_{\mu-1,n} \\ -g_{\mu+1,1} & \cdots & -g_{\mu+1,\nu-1} & -g_{\mu+1,\nu+1} & \cdots & -g_{\mu+1,n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{n1} & \cdots & -g_{n,\nu-1} & -g_{n,\nu+1} & \cdots & g_{nn} \end{vmatrix}$$

Das Bildungsgesetz der Determinantenglieder ist einfach: Die $g_{\nu\nu}$ sind die positive Summe der in dem Knotenpunkt ν zusammenlaufenden Leitfähigkeiten, die $g_{\mu\nu}$ sind die Leitfähigkeiten der unmittelbaren Verbindungsleitungen der Knotenpunkte μ und ν, also an sich ebenfalls positive Grössen oder gleich Null und es ist

$$g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}.$$

Die Determinante D ist also symmetrisch zur Hauptdiagonalreihe, und die Glieder der Hauptdiagonale sind mindestens gleich oder grösser als die Summe der absoluten Werte der Glieder der entsprechenden Reihe oder Säule, Eigenschaften, die, wie wir später sehen werden, die rechnerische Auswertung der Unbekannten sehr erleichtern.

Aus den ermittelten Spannungsverlusten ergiebt sich schliesslich die Stromverteilung, und zwar wird:

$$J_{\mu\nu} = \varepsilon_{\mu\nu}\, g_{\mu\nu} = \frac{\varepsilon_{\mu\nu}}{w_{\mu\nu}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (129)$$

Die Reihenfolge der Kennziffern zeigt zugleich die Stromrichtung an.

Das Gleichungssystem (XXVII), welches die Spannungsverluste der Knotenpunkte abhängig von den Leitfähigkeiten bezw. Widerständen der Leiter darstellt, ist zuerst von TEICHMÜLLER[1]) aufgestellt worden; gleichzeitig wurden von COLTRI[2]) ähnliche Gleichungen entwickelt, in denen an Stelle der Spannungsverluste die Potentiale der Knotenpunkte als Unbekannte benutzt wurden. Die erste Form hat vor der letzteren den wesentlichen Vorzug, dass in den Rechnungen die etwa 100 mal so kleinen Zahlen der Spannungsverluste auftreten, daher eine wesentlich grössere Genauigkeit mit geringerem Rechenaufwand erreicht werden kann. Die Anwendbarkeit des Rechenschiebers bei der gebräuchlichen Genauigkeit von etwa $1\,^0/_0$ wird erst durch die hier benutzte TEICHMÜLLERsche Form der Gleichungen ermöglicht.

77. Strommethode. Betrachten wir nunmehr die Leiterströme als Unbekannte, deren Abhängigkeit von den bekannten Leitungswiderständen und den gegebenen Belastungsströmen vermittelst der KIRCHHOFFschen Regeln abgeleitet werden soll, so sehen wir bald, dass wir mehr Gleichungen aufstellen können als Unbekannte vorhanden sind. In dem konkreten Falle der Fig. 89 (S. 108) haben wir sechs Unbekannte, nämlich die Leiterströme J_{I1}, J_{II1}, J_{III1}, J_{12}, J_{23}, J_{31}, mit denen wir für die drei Knotenpunkte nach dem ersten KIRCHHOFFschen Satz die drei Gleichungen bilden können:

$$\left.\begin{aligned} J_{I1} + J_{21} + J_{31} &= J_1 \\ J_{II2} + J_{12} + J_{32} &= J_2 \\ J_{III3} + J_{13} + J_{23} &= J_3 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (130)$$

Ferner können wir sieben geschlossene Kreise bilden, nämlich $I\,1\,2\,II$, $II\,2\,3\,III$, $III\,3\,1\,I$, $1\,2\,3$, $I\,1\,3\,2\,II$, $II\,2\,1\,3\,III$ und $III\,3\,2\,1\,I$, die vermittelst des zweiten KIRCHHOFFschen Gesetzes sieben weitere Gleichungen von der Form geben:

$$w_{I1}\, J_{I1} + w_{12}\, J_{12} + \cdots = 0.$$

---

1) TEICHMÜLLER: Über die Stromverteilung in elektrischen Leitungsnetzen, ETZ 1893, S. 537, sowie Elektrische Leitungsnetze.

2) COLTRI: Über die Stromverteilung in Leitungsnetzen, ETZ 1893, S. 425.

Diese zehn Gleichungen für unsere sechs Unbekannten sind natürlich nicht voneinander unabhängig, sondern die Gleichungen der zusammengesetzten Figuren folgen, wie leicht ersichtlich, durch Addition aus den Gleichungen der einfachen Kreise, also der Maschen, aus denen sie gebildet sind. Auch von den vorhandenen vier Maschen ist noch die Gleichung je einer Masche aus denen der übrigen durch entsprechende Kombination zu erhalten und nur drei von ihnen sind unabhängig voneinander und geben zusammen mit den nach dem ersten KIRCHHOFFschen Satz erhaltenen Gleichungen (130) die sechs zur Bestimmung der Unbekannten nötigen Gleichungen. Welche der vier möglichen Kombinationen der vorhandenen vier Maschen zu je dreien gewählt wird, ist gleichgültig; jede einzelne derselben genügt zur Lösung der Aufgabe.

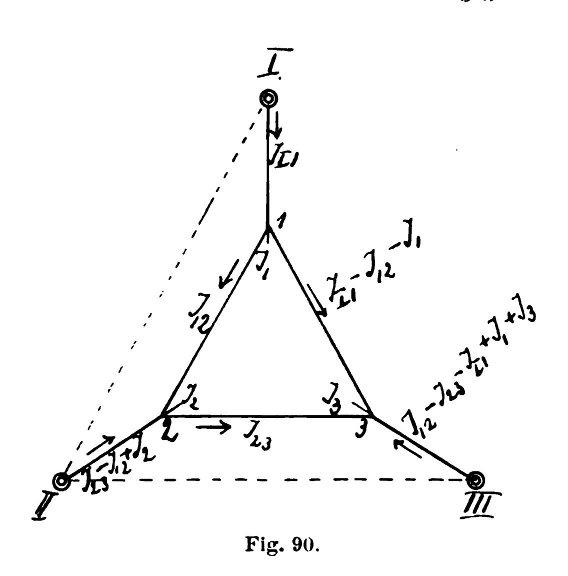


Fig. 90.

Werden nun drei der sechs Unbekannten vermittelst der Gleichungen (130) eliminiert, so bleiben noch drei Unbekannte und zu ihrer Bestimmung die drei nach dem Vorhergehenden zu bildenden Gleichungen, die die Abhängigkeit der Unbekannten von den Leiterwiderständen und den Belastungsströmen ausdrücken. Werden also beispielsweise die Ströme J_{I1}, J_{12} und J_{23} als Unbekannte gewählt, so berechnen sich die übrigen Leiterströme aus den Gleichungen (130) zu

$$\begin{aligned} J_{13} &= J_{I1} - J_{12} - J_1 \\ J_{II2} &= J_{23} - J_{12} + J_2 \\ J_{III3} &= J_{12} - J_{23} - J_{I1} + J_1 + J_3 \end{aligned}$$

(Fig. 90), und wir erhalten aus den drei Maschen $I\,1\,2\,II$, $II\,2\,3\,III$ und $1\,2\,3$ die Gleichungen:

$$\left.\begin{aligned} w_{I1}\, J_{I1} + (w_{12} + w_{II2})\, J_{12} - w_{II2}\, J_{23} &= w_{II2}\, J_2 \\ w_{III3}\, J_{I1} - (w_{II2} + w_{III3})\, J_{12} + (w_{II2} + w_{23} + w_{III3}) J_{23} & \\ = w_{III3}\, (J_1 + J_3) - w_{II2}\, J_2 & \\ - w_{13}\, J_{I1} + (w_{12} + w_{13})\, J_{12} + w_{23}\, J_{23} &= - w_{13}\, J_1 \end{aligned}\right\} \quad (131)$$

durch die die Stromverteilung des Netzes bestimmt wird.[1])

Ist allgemein ein Halbnetz von l Leitern und k Knotenpunkten gegeben, so können wir zunächst k der l unbekannten Leiterströme eliminieren, indem

[1]) Diese Methode der Netzberechnung ist zuerst von HERZOG und STARK (ETZ 1890, S. 221 und 445: Über die Stromverteilung in Leitungsnetzen) angegeben und mit dem Namen der Schnittmethode bezeichnet worden, da sich in den Punkten des grössten Spannungsverlustes die Leitungen aufschneiden lassen, ohne die Stromverteilung zu ändern.

wir auf die k Knotenpunkte den ersten Satz von KIRCHHOFF anwenden. Es sind daher im allgemeinen Fall $l - k$ Gleichungen zwischen den $l - k$ unbekannten Leiterströmen und den bekannten Leitungswiderständen und Belastungsströmen zu bilden, indem der zweite KIRCHHOFFsche Satz auf $l - k$ einfache Maschen angewendet wird. Auch hier ist das Bildungsgesetz der Gleichungen, nachdem einmal die Ströme in den Leitern als Summen von unbekannten Leitungs- und bekannten Belastungsströmen festgelegt sind, einfach, so dass die Gleichungen sofort hingeschrieben werden können. Das Bildungsgesetz lässt sich in der folgenden Form aussprechen: Umkreist man eine Masche in irgend einer Richtung, so ist die algebraische Summe der Spannungsverluste, hervorgerufen von den unbekannten Strömen, gleich der algebraischen Summe der Spannungsverluste, hervorgerufen von den bekannten Belastungsströmen, wenn die Masche in entgegengesetzter Richtung umkreist wird.

Das Resultat, nämlich die gesuchten Leiterströme, erhalten wir demnach wieder in der Form

$$J_{\mu\nu} = \frac{\Sigma D_{\mu\nu}\, w J}{D},$$

worin D die aus dem System der $l - k$ Gleichungen gebildete Determinante, $D_{\mu\nu}$ die Unterdeterminante des $\mu\nu^{\text{ten}}$ Gliedes derselben bedeutet.

Wie leicht ersichtlich, ist aber die Nenner-Determinante nicht symmetrisch in bezug auf ihre Hauptdiagonalreihe und ebensowenig sind notwendigerweise die Glieder der Hauptdiagonale gleich oder grösser als die Summe der absoluten Werte der Glieder der entsprechenden Reihe oder Säule. Es giebt zwar eine andere Methode, die Maschenmethode von MAXWELL,[1]) die vermöge einer besonderen Zerlegung der Leiterströme in die Maschen umkreisende Ströme zu Gleichungen mit symmetrischer Determinante gelangt; wir können jedoch davon absehen, diese Methode in den Kreis unserer Betrachtungen zu ziehen, da sie voraussetzt, dass das vollständige Netz, also beide Netzhälften samt Belastungswiderständen und Stromquellen, in einer Ebene ausgebreitet werden kann, ohne dass die Leiter einander schneiden, eine Voraussetzung, die bei praktischen Netzen nicht allgemein verwirklicht werden kann.

Die praktische Auflösung der Gleichungen.

78. Allgemeines über die einschlägigen Verfahren.

Wir haben also in beiden Fällen, ob wir nun die Leiterströme oder die Spannungsverluste in den Knotenpunkten als Unbekannte auffassen, das Resultat in der Form eines Quotienten zweier Determinanten erhalten, von denen die Zähler-Determinante aus der Nenner-Determinante dadurch abgeleitet wird, dass die der Ordnungszahl der Unbekannten entsprechende, also etwa die ν^{te} Säule durch die bekannten Werte der rechten Seiten der Gleichungen ersetzt werden, wobei vorausgesetzt ist, dass die Gleichungen in der Normalform gegeben sind:

1) J. A. FLEMING: Phil. Mag. Bd. XX, S. 221, 1885; HERZOG-STARK: ETZ 1890, S. 445, sowie HERZOG-FELDMANN: Elektrische Leitungsnetze; W. FEUSSNER: Über Stromverzweigung in netzförmigen Leitern, Annalen der Physik, Bd. IX, S. 1304, 1902.

$$\left.\begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1\nu}x_\nu + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ a_{\nu 1}x_1 + a_{\nu 2}x_2 + \cdots + a_{\nu\nu}x_\nu + \cdots + a_{\nu n}x_n = b_\nu \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{n\nu}x_\nu + \cdots + a_{nn}x_n = b_n \end{array}\right\} . \quad (132)$$

Es ist also:

$$x_\nu = \frac{\sum_{\mu=1}^{n} b_\mu D_{\mu\nu}}{D},$$

wo

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} \cdots a_{1\nu} \cdots a_{1n} \\ \cdots\cdots\cdots \\ a_{\nu 1} \cdots a_{\nu\nu} \cdots a_{\nu n} \\ \cdots\cdots\cdots \\ a_{n1} \cdots a_{n\nu} \cdots a_{nn} \end{vmatrix}$$

und $$D_{\mu\nu} = (-1)^{\mu+\nu} \begin{vmatrix} a_{11} & \cdots a_{1,\nu-1} & a_{1,\nu+1} & \cdots a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{\mu-1,1} & \cdots a_{\mu-1,\nu-1} & a_{\mu-1,\nu+1} & \cdots a_{\mu-1,n} \\ a_{\mu+1,1} & \cdots a_{\mu+1,\nu-1} & a_{\mu+1,\nu+1} & \cdots a_{\mu+1,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & \cdots a_{n,\nu-1} & a_{n,\nu+1} & \cdots a_{nn} \end{vmatrix}$$

Hiermit ist die Aufgabe wohl theoretisch gelöst, d. h. die unbekannten Ströme oder Spannungsverluste sind als explizite Funktionen der bekannten Gleichungskoeffizienten dargestellt, nicht aber praktisch, da ja die numerische Berechnung der Determinanten selbst bei nicht bedeutender Gliederzahl (über $n = 4$ oder 5) eine ausserordentlich umständliche und zeitraubende Arbeit darstellt, die überdies bei den oft zu wiederholenden gleichartigen Operationen leicht zu Rechenfehlern Veranlassung giebt, die erst am Schluss der Rechnung zum Vorschein kommen. Ist daher eine grössere Zahl von Gleichungen gegeben, so zieht man es vor, von diesen unmittelbar auszugehen.

Die Auflösung eines Systems linearer Gleichungen geschieht bekanntlich durch stufenweise Elimination der Unbekannten, doch gelten bei grösserer Zahl von Gleichungen dieselben Vorbehalte bezüglich der langwierigen Arbeit, der Unsicherheit der Rechnung u. s. w., wie für die Lösung der Determinanten. Beide Rechenoperationen bedeuten ja auch eigentlich das Gleiche. Für bestimmte Formen von Gleichungen sind jedoch bequeme und sichere Lösungsverfahren bekannt, die einerseits, von einem Näherungswert ausgehend, eine stufenweise Annäherung an den wahren Wert der Unbekannten bis zu einer beliebigen Genauigkeit gestatten [GAUSS,[1] SEIDEL,[2] MEHMKE[3])], andererseits

1) CH. L. GERLING: Die Ausgleichsrechnungen der praktischen Geometrie, 1843; und W. v. FREEDEN: Die Praxis der Methode der kleinsten Quadrate, Braunschweig 1863. FREEDEN hebt ausdrücklich hervor, dass die Methode von GAUSS angegeben worden ist. Vgl. auch B. SOSCHINSKI, Die Ausgleichsrechnungen, ETZ 1905, S. 1069.

2) L. SEIDEL: Über ein Verfahren, . . . lineare Gleichungen durch successive Annäherung aufzulösen. Abhandlungen der math.-phys. Klasse der bayr. Akad. d. Wissensch., XI. Bd., 1874, S. 81. Dieses Verfahren ist identisch mit dem von GAUSS (s. Fussnote 1).

3) R. MEHMKE: Über das SEIDELsche Verfahren . . . Math. Sammlung der Moskauer math. Gesellschaft, Bd. XVI, S. 342, 1892.

auf Grund gewisser Vereinfachungen des Gleichungs- oder Determinantensystems eine schrittweise Ableitung der Determinanten höherer Ordnung aus denen niederer Ordnung ermöglichen [JÜRGENS,[1]) VERHOECKX[2])]. Beide Verfahren gestatten auf jeder Stufe in mehr oder weniger bequemer Weise eine Kontrolle bezüglich der Richtigkeit der Rechnung, eine Bedingung, die bei so umfangreichen Berechnungen für deren Zuverlässigkeit von fundamentaler Bedeutung ist.

Für die Anwendung des ersten Verfahrens, des GAUSSschen — oder des SEIDELschen, wie es vielfach bezeichnet wird —, ist Bedingung, dass die Diagonalglieder der Determinante des Systems gleich oder grösser sind, als die Summe der absoluten Werte der in der entsprechenden Reihe oder Säule stehenden übrigen Glieder, da hierauf die Konvergenz des Verfahrens beruht (vgl. JÜRGENS).[1]) Das zweite Verfahren, das von VERHOECKX, setzt eine in bezug auf die Hauptdiagonale symmetrische Form der Determinante voraus.

79. Wahl des Gleichungssystems.

Es fragt sich zunächst, welches der beiden Gleichungssysteme vorzuziehen ist, dasjenige mit den Leiterströmen oder das mit den Knotenpunkts-Spannungsverlusten als Unbekannten. Unter sonst gleichen Verhältnissen wird natürlich dasjenige System zu bevorzugen sein, das die geringere Zahl von Gleichungen giebt, da ja die Schwierigkeit der Lösung mit der Zahl der Gleichungen wächst. Wie wir gesehen haben [77 u. 76], erhalten wir $l - k$ Gleichungen, falls wir die Ströme, k Gleichungen, falls wir die Spannungsverluste als Unbekannte einführen. Das erstere wird also vorzuziehen sein, wenn

$$l - k < k \quad \text{oder} \quad l < 2k$$

ist. Dies ist nun in praktischen Netzen fast nie der Fall, wie die folgende einfache Überlegung zeigt.

Enthält das Netz nur dreiseitige Knotenpunkte, und zwar neben k Knoten s Speisepunkte, so ist jedenfalls

$$l > \frac{3}{2} k,$$

denn in jedem Knoten laufen drei Leitungen zusammen (andernfalls wäre der Punkt ja kein Knotenpunkt) und jede Leitung gehört zwei Knotenpunkten an. Hierzu kommen dann noch die Leiter, die die Knoten mit den Speisepunkten verbinden.

Für vierseitige Knotenpunkte dagegen wird

$$l > \frac{4}{2} k, \quad \text{also} \quad l > 2k$$

und um so mehr natürlich bei mehr als vierseitigen Knoten. Nun enthalten die praktischen Netze aber nur selten dreiseitige, sondern meist vier- und mehrseitige Knoten, so dass also fast stets

$$l - k > k$$

1) E. JÜRGENS: Zur Auflösung linearer Gleichungssysteme, Aachen 1886.

2) P. M. VERHOECKX: Eine analytische und graphische Methode zur Berechnung von geschlossenen Leitungsnetzen, Z. f. E. 1904, S. 293, und L'Écl. électr. 1904, Nr. 16 und 17.

wird, und die Einführung der Spannungsverluste in den Knotenpunkten die geringere Zahl von Gleichungen giebt. Dazu kommt als ausschlaggebender Punkt, dass, wie bereits erwähnt [77], die Determinante des Gleichungssystems bei der Strommethode weder symmetrisch zur Hauptdiagonale ist, noch dass die Glieder der Hauptdiagonale gleich oder grösser als die Summe der absoluten Werte der Glieder der entsprechenden Reihe oder Säule sind, dass also

$$a_{\nu\nu} \text{ nicht } \geqq \Sigma \, | \, a_{\mu\nu}$$

und

$$a_{\mu\nu} \gtrless a_{\nu\mu}.$$

In diesem Falle ist man gezwungen, die Determinante nach den allgemeinen Regeln der Determinantentheorie auszuwerten oder sie nach einer von JÜRGENS angegebenen Methode (s. Fussnote 1, S. 115) so umzuformen, dass die erste Bedingung erfüllt wird. Diese Rechnung erspart man sich, wenn die Spannungsmethode angewandt wird.

Im folgenden sollen nun die erwähnten Rechnungsverfahren für die Spannungsmethode behandelt und an einem Beispiel erläutert werden.

80. Gausssches Näherungsverfahren. Werden also die Spannungsverluste in den Knotenpunkten als Unbekannte eingeführt, so geht das allgemeine Gleichungssystem (132) in das bereits angeführte System (XXVII) [76] über:

$$\left.\begin{array}{r}
g_{11}\varepsilon_1 - g_{12}\varepsilon_2 - \cdots - g_{1\nu}\varepsilon_\nu - \cdots - g_{1n}\varepsilon_n = J_1 \\
-g_{21}\varepsilon_1 + g_{22}\varepsilon_2 - \cdots - g_{2\nu}\varepsilon_\nu - \cdots - g_{2n}\varepsilon_n = J_2 \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
-g_{\nu 1}\varepsilon_1 - g_{\nu 2}\varepsilon_2 - \cdots + g_{\nu\nu}\varepsilon_\nu - \cdots - g_{\nu n}\varepsilon_n = J_\nu \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
-g_{n1}\varepsilon_1 - g_{n2}\varepsilon_2 - \cdots - g_{n\nu}\varepsilon_\nu - \cdots + g_{nn}\varepsilon_n = J_n
\end{array}\right\} \quad \text{(XXVII)}$$

Hierin bedeutet also $g_{\nu\mu}$ die Leitfähigkeit des unmittelbaren Verbindungsleiters des μ^{ten} und ν^{ten} Knotenpunktes, wobei etwa mehrfache parallele Verbindungen durch die äquivalente einfache Leitung zu ersetzen sind, und $g_{\nu\nu}$ die Summe der Leitfähigkeiten der in ν zusammenlaufenden Leiter Die Bedingung für die Konvergenz des Näherungsverfahrens

$$g_{\nu\nu} \quad g_{\nu 1} + g_{\nu 2} + \cdots + g_{\nu,\nu-1} + g_{\nu,\nu+1} + \cdots + g_{\nu n}$$

ist hier erfüllt, da $g_{\nu\nu}$ ausser den $g_{\nu\mu}$ noch die Leitfähigkeiten $g_{\nu I}$, $g_{\nu II} \cdots$ enthält.

Sind Näherungswerte der Unbekannten bekannt, etwa a_1 für ε_1, a_2 für $\varepsilon_2 \cdots$ a_ν für ε_ν, so setzt man

$$\varepsilon_\nu = a_\nu + \varepsilon_\nu'$$

und erhält aus (XXVII) das folgende Gleichungssystem:

$$-g_{\nu 1}(a_1 + \varepsilon_1') - g_{\nu 2}(a_2 + \varepsilon_2') - \cdots + g_{\nu\nu}(a_\nu + \varepsilon_\nu') - \cdots - g_{\nu n}(a_n + \varepsilon_n') = J_\nu$$

oder

$$-g_{\nu 1}\varepsilon_1' - g_{\nu 2}\varepsilon_2' - \cdots + g_{\nu\nu}\varepsilon_\nu' - \cdots - g_{\nu n}\varepsilon_n' = J_\nu' \qquad (133)$$

wo

$$J_\nu' = J_\nu - (g_{\nu\nu}\, a_\nu - g_{\nu 1}\, a_1 - g_{\nu 2}\, a_2 - \cdots - g_{\nu,\nu-1}\, a_{\nu-1} \\ - g_{\nu,\nu+1}\, a_{\nu+1} - \cdots - g_{\nu n}\, a_n).$$

Für einigermassen gute Näherungswerte der ε sind diese J_ν' bedeutend kleiner als die J_ν; sie würden ja verschwinden, wenn $a_\nu = \varepsilon_\nu$ wäre.

Sind keine Näherungswerte vorhanden, so geht man unmittelbar von den gegebenen Werten der J_ν aus, mit anderen Worten man setzt $a = 0$. Nun führt man in das Gleichungssystem (133) für irgend ein ε, z. B. ε_k, den Näherungswert $\frac{J_k'}{g_{kk}}$ ein, der entsteht, wenn man die $g_{\nu k}\, \varepsilon_\nu\ (\nu \gtrless k)$ gegenüber $g_{kk}\, \varepsilon_k$ vernachlässigt. Setzt man also

$$\varepsilon_k' = \frac{J_k'}{g_{kk}} + \varepsilon_k'',$$

so folgt aus (133):

$$\left.\begin{array}{l} g_{11}\,\varepsilon_1' - g_{12}\,\varepsilon_2' - \cdots - g_{1k}\varepsilon_k'' - \cdots - g_{1n}\,\varepsilon_n' = J_1' - \left(-\frac{J_k'}{g_{kk}}\, g_{1k}\right) = J_1'' \\ -g_{21}\,\varepsilon_1' + g_{22}\,\varepsilon_2' - \cdots - g_{2k}\varepsilon_k'' - \cdots - g_{2n}\,\varepsilon_n' = J_2' - \left(-\frac{J_k'}{g_{kk}}\, g_{2k}\right) = J_2'' \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ -g_{k1}\,\varepsilon_1' - g_{k2}\,\varepsilon_2' - \cdots + g_{kk}\varepsilon_k'' - \cdots - g_{kn}\,\varepsilon_n' = J_k' - \left(+\frac{J_k'}{g_{kk}}\, g_{kk}\right) = 0 \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \end{array}\right\} \quad (134)$$

und in diesen Gleichungen ist die Summe der absoluten Werte der rechten Seiten noch kleiner geworden als in (133), da ja g_{kk} grösser ist als $\Sigma g_{\nu k}$. Die Abnahme von ΣJ und damit die der einzelnen J wird um so grösser sein, je grösser J_k bezw. $\frac{J_k}{g_{kk}}$ war, und man thut daher gut, stets dasjenige J zu wählen, das durch seinen Diagonalkoeffizient dividiert den grössten absoluten Wert giebt. Ist nun weiterhin J_l'' der grösste Wert unter den J'', so führt man

$$\varepsilon_l' = \frac{J_l''}{g_{ll}} + \varepsilon_l''$$

ein und erhält das weitere Gleichungssystem

$$\left.\begin{array}{l} g_{11}\,\varepsilon_1' - \cdots - g_{1k}\varepsilon_k'' - g_{1l}\,\varepsilon_l'' - \cdots - g_{1n}\,\varepsilon_n' = J_1'' - \left(-\frac{J_l''}{g_{ll}}\, g_{1l}\right) = J_1''' \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ -g_{k1}\,\varepsilon_1' - \cdots + g_{kk}\varepsilon_k'' - g_{kl}\,\varepsilon_l'' - \cdots - g_{kn}\,\varepsilon_n' = 0 - \left(-\frac{J_l''}{g_{ll}}\, g_{kl}\right) = J_k''' \\ -g_{l1}\,\varepsilon_1' - \cdots - g_{lk}\,\varepsilon_k'' + g_{ll}\,\varepsilon_l'' - \cdots - g_{ln}\,\varepsilon_n' = J_l'' - \left(+\frac{J_l''}{g_{ll}}\, g_{ll}\right) = 0 \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \end{array}\right\} \quad (135)$$

in dem die absoluten Werte der rechten Seiten noch kleiner geworden sind als vorher. Indem man diese Substitutionen weiter fortsetzt, bis auch der grösste Wert der schliesslichen rechten Seiten — er sei $J_p^{(z)}$ — so klein ge-

worden ist, dass die Grösse $\frac{J_p^{(z)}}{g_{pp}}$ gegen ε_p vernachlässigt werden kann, erhält man schliesslich

$$\varepsilon_1 = a_1 + \Sigma \varepsilon_1'; \quad \varepsilon_2 = a_2 + \Sigma \varepsilon_2' \cdots$$

Wie aus dem Vergleich der Gleichungssysteme (XXVII) und (133) ff. hervorgeht, ändern sich bei dieser Rechnung, abgesehen von den Akzenten der ε, die linken Seiten des Systems nicht, sondern nur die rechten. Man braucht also auch nur diese hinzuschreiben und kann sie in übersichtlicher Weise, ebenso wie die ε in einem entsprechenden Schema vereinigen.

Die Kontrolle der Rechnung ist sehr einfach. Denn setzt man irgend einen zusammengehörigen Satz von Werten der ε, z. B. den zu den Gleichungen (135) gehörigen

$$\varepsilon_1 = a_1 + \varepsilon_1'; \quad \varepsilon_2 = a_2 + \varepsilon_2'; \cdots \varepsilon_k = a_k + \varepsilon_k' + \varepsilon_k''; \quad \varepsilon_l = a_l + \varepsilon_l' + \varepsilon_l'' \cdots$$

in diese Gleichungen ein, so müssen die sich ergebenden rechten Seiten mit den zuletzt gefundenen J_r''' übereinstimmen. Ist dies aber etwa infolge ungenauer Rechnung nicht der Fall, so braucht man durchaus nicht den Rechenfehler aufzusuchen, sondern fährt mit den so erhaltenen richtigen J_r''' in der Rechnung fort.

Beispiel. Ein Beispiel wird das Verfahren am besten beleuchten. Es sei das Netz der Fig. 91 gegeben,[1]) in welchem die den Leitungen beigefügten Zahlen die Leitfähigkeiten in Ω^{-1}, die an den Knotenpunkten mit Strichen bezeichneten die Belastungen in Ampere angeben. Die Leitfähigkeiten sind also:

$$\begin{array}{llll} g_{11} = 268{\cdot}88 & g_{12} = 47{\cdot}62 & g_{13} = 0 & g_{14} = 0 \\ & g_{22} = 338{\cdot}04 & g_{23} = 142{\cdot}84 & g_{24} = 0 \\ & & g_{33} = 320{\cdot}90 & g_{34} = 106{\cdot}64 \\ & & & g_{44} = 291{\cdot}60 \end{array}$$

und die Gleichungen lauten:

$$\begin{array}{rcl} 268{\cdot}88\,\varepsilon_1 - 47{\cdot}62\,\varepsilon_2 & & = 100 \\ -\,47{\cdot}62\,\varepsilon_1 + 338{\cdot}04\,\varepsilon_2 - 142{\cdot}84\,\varepsilon_3 & & = 100 \\ -\,142{\cdot}84\,\varepsilon_2 + 320{\cdot}90\,\varepsilon_3 - 106{\cdot}64\,\varepsilon_4 & & = 100 \\ -\,106{\cdot}64\,\varepsilon_3 + 291{\cdot}60\,\varepsilon_4 & & = 100. \end{array}$$

Das Netz soll einen Teil eines Zweileiternetzes darstellen, dessen Spannung $E = 110$ Volt, dessen maximaler Spannungsverlust ε also etwa 1 Volt beträgt. Wir können demnach in Anbetracht, dass bis zu den Knotenpunkten nur ein Teil des maximalen Spannungsverlustes auftritt, als ersten Näherungswert den Wert 0·5 wählen, so dass

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 0{\cdot}5$$

wird.

Ehe wir mit der Rechnung selbst beginnen, wollen wir uns über die Genauigkeit Rechenschaft geben, die wir bei der Auswertung der ε erreichen wollen. In Anbetracht der im allgemeinen bei den Netzberechnungen herrschen-

[1]) Aus Teichmüller: Sammlung von Aufgaben, Leipzig 1902.

den Unsicherheiten der Annahmen wird es vollauf genügen, wenn die ε auf $1\,^0/_0$ genau ermittelt werden. Für gewöhnlich genügt eine geringere Genauigkeit. Wir werden also, da die ε um 1 herum liegen, noch die dritte Dezimale in der Rechnung mitführen, um sie bei der schliesslichen Summe zur genauen Bestimmung der zweiten Dezimale benutzen zu können. Nun haben die $g_{\nu\nu}$ die Grössenordnung 100. Wollen wir also durch Division mit 100 noch 0·001 erhalten können, so müssen die J' bis auf die Zehntel genau, also noch mit der zweiten Dezimale geführt werden. Für gewöhnliche Rechnungen genügt die erste Dezimale.

Führen wir nur den Näherungswert $a = 0{\cdot}5$ ein, so erhalten wir an Stelle der rechten Seiten unseres Gleichungssystems:

$$J_1' = 100 - (134{\cdot}44 - 23{\cdot}81) = -10{\cdot}63$$

$$J_2' = 100 - 73{\cdot}79 = 26{\cdot}21$$

$$J_3' = 100 - 35{\cdot}71 = 64{\cdot}29$$

$$J_4' = 100 - 92{\cdot}48 = 7{\cdot}52.$$

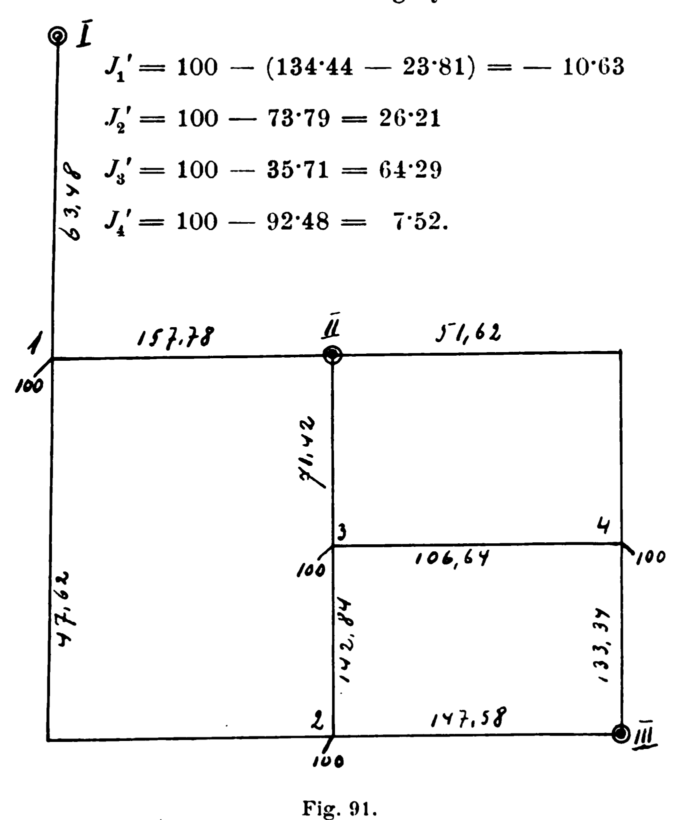


Fig. 91.

Den grössten absoluten Wert giebt $\dfrac{J_3'}{g_{33}}$; aus J_3' bilden wir also den weiteren Näherungswert für ε_3:

$$\frac{J_3'}{g_{33}} = \frac{64{\cdot}29}{320{\cdot}90} = +\,0{\cdot}200$$

und hätten nun nach Gleichung (134) die Koeffizienten der ε_3 mit dieser Zahl zu multiplizieren und die Produkte algebraisch von den Werten des J' zu subtrahieren. Bequemer wird jedoch die Rechnung, wenn wir jedesmal nur die erste Stelle des Näherungswertes für die Rechnung benützen, hier also 0·2, da wir dann alle Rechnungen im Kopf bewältigen können. In diesem speziellen Falle haben allerdings die anderen Dezimalen von selbst

den Wert Null; allgemein ist dies natürlich nicht der Fall. Führen wir die angedeuteten Rechenoperationen aus und vereinigen zugleich die Näherungswerte der ε sowie die rechten Seiten der Gleichungen in Tafeln, deren entsprechende Zeilen bezw. Säulen wir gleich numerieren, so erhalten wir:

	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4		1	2		
1	0·500	0·500	0·500	0·500	J_1	— 10·63	— 10·63	=	— 10·63 + 0·2 · 0
2	—	—	0·200	—	J_2	26·21	54·78	=	26·21 + 0·2 · 142·84
					J_3	64·29	0·11	=	64·29 — 0·2 · 320·90
					J_4	7·52	28·85	=	7·52 + 0·2 · 106·64

Wir sehen also, dass in der That die absolute Summe der J-Werte abnimmt, trotzdem J_2 und J_4 grösser geworden sind als vorher. Nunmehr hat J_2 den grössten Wert, wir setzen also für ε_2 den Näherungswert $+\frac{54{\cdot}78}{338{\cdot}04} = 0{\cdot}2$ und berechnen hiermit wiederum die weiteren J. Die Ausführung der Rechnung ergiebt die in den folgenden Tabellen niedergelegten Zahlen — der Bequemlichkeit wegen sind die Kommas sowie die durch diese bedingten Nullen der J fortgelassen worden (s. Tabelle VII).

Nach der zehnten Reihe ist unter 10′ eine Kontrollrechnung ausgeführt worden und ebenso nach der vierzehnten Reihe. Beide ergeben die Richtigkeit der Rechnung. Nach der vierzehnten Reihe konnte die Rechnung abgebrochen werden, da die letzten Zahlen, durch $g_{\nu\nu}$ dividiert, kleiner als 0·001 werden. Wir erhalten also als Knotenpunkts-Spannungsverluste die Werte

$$\varepsilon_1 = 0{\cdot}50;\quad \varepsilon_2 = 0{\cdot}73;\quad \varepsilon_3 = 0{\cdot}85;\quad \varepsilon_4 = 0{\cdot}65.$$

Tabelle VII.

	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	J_1	J_2	J_3	J_4
1	0·500	0·500	0·500	0·500	— 1063	2621	6429	752
2	—	—	0·2	—	— 1063	5478	11	2885
3	—	0·2	—	—	— 111	— 1283	2868	2885
4	—	—	—	0·1	— 111	— 1283	3934	— 31
5	—	—	0·1	—	— 111	145	725	1035
6	—	—	—	0·04	— 111	145	1152	— 131
7	—	—	0·04		— 111	716	— 132	296
8	—	0·02	—	—	— 16	40	154	296
9	—	—	—	0·01	— 16	40	261	4
10	—	—	0·01	—	— 16	183	— 60	111
10′	—	—	—	—	— 16	183	— 60	110
11	—	0·005	—	—	8	14	11	110
12	—	—	—	0·004	8	14	54	— 7
13	—	—	0·002	—	8	43	— 10	14
14	—	0·001		—	13	9	4	14
14′	—	—	—	—	13	8	3	15
	0·500	0·726	0·852	0·654				

81. Näherungsverfahren von Mehmke.

Ist nun diese Art der Berechnung zwar sehr bequem, so wird sie doch bei einer grösseren Zahl von Gleichungen oft recht langwierig, besonders da bei den Kontrollrechnungen alle Multiplikationen bis auf die zweite Dezimale (d. h. bis auf 1 : 10000) genau ausgeführt werden müssen, also den Gebrauch des Rechenschiebers ausschliessen. Man kann nun die Zahl der Interpolationen des Gaussschen Verfahrens bedeutend abkürzen, wenn man mit Mehmke[1]) aus je zwei oder drei Gleichungen zwei bezw. drei Näherungswerte ε_k', ε_l', ε_m' zugleich bestimmt und alle diese Werte zur Reduktion der rechten Seiten benutzt. So würden wir z. B. bei gleichzeitiger Bestimmung zweier Näherungswerte ε_2 und ε_3 für unser Beispiel aus den reduzierten Gleichungen 2 und 3:

$$338{\cdot}04\,\varepsilon_2' - 142{\cdot}84\,\varepsilon_3' = 26{\cdot}21$$
$$-\,142{\cdot}84\,\varepsilon_2' + 320{\cdot}90\,\varepsilon_3' = 64{\cdot}29$$

erhalten:

$$\varepsilon_2' = 0{\cdot}2\,; \quad \varepsilon_3' = 0{\cdot}3$$

und daraus

$$\begin{aligned} J_1'' &= -\,10{\cdot}63 + 0{\cdot}2 \cdot 47{\cdot}62 = -\,1{\cdot}11 \\ J_2'' &= 26{\cdot}21 - 0{\cdot}2 \cdot 338{\cdot}04 + 0{\cdot}3 \cdot 142{\cdot}84 = 1{\cdot}45 \\ J_3'' &= 64{\cdot}29 + 0{\cdot}2 \cdot 142{\cdot}84 - 0{\cdot}3 \cdot 320{\cdot}90 = -\,3{\cdot}45 \\ J_4'' &= 7{\cdot}52 + 0{\cdot}3 \cdot 106{\cdot}64 = 39{\cdot}50. \end{aligned}$$

Wie ersichtlich, ist die Konvergenz der Näherungswerte viel bedeutender, aber die Rechnung ist jetzt nicht mehr so bequem wie vorher. Dagegen wird durch einen anderen, ebenfalls von Gauss[2]) angegebenen Kunstgriff die Konvergenz des Gaussschen Näherungsverfahrens gleichfalls beschleunigt und doch die Bequemlichkeit der Rechnung gewahrt und sogar vergrössert.

82. Gausssches Verfahren. Fortsetzung.

Dieser Kunstgriff besteht darin, dass man in dem Gleichungssystem zunächst eine neue Unbekannte ε_0' einführt,[3]) indem man

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1' - \varepsilon_0'; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2' - \varepsilon_0' \cdots \quad . \; . \; . \; . \quad (136)$$

setzt, und dann zur Vervollständigung dem so erhaltenen Gleichungssystem von n Gleichungen mit $n + 1$ Unbekannten noch eine neue Gleichung hinzufügt, deren Glieder so gebildet sind, dass sowohl ihre rechte Seite als die Koeffizienten von ε_0', $\varepsilon_1' \cdots \varepsilon_n'$ die algebraische Summe der entsprechenden Zahlen der zuletzt gebildeten Gleichungen zu Null ergänzen. Bei unseren Gleichungsformen, bei denen die Koeffizienten entsprechender vertikaler und horizontaler Reihen einander gleich sind, $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$, stimmen natürlich auch die Koeffizienten der Unbekannten ε_1', $\varepsilon_2' \cdots$ der neu zu bildenden Gleichung mit den entsprechenden Koeffizienten der neu entstandenen ε_0'-Glieder überein. Doch gilt die Methode auch allgemein für Gleichungen, bei denen

$$g_{\mu\nu} \gtrless g_{\nu\mu}$$

ist, so lange nur

$$g_{\nu\nu} > \Sigma\, g_{\mu\nu} > \Sigma\, g_{\nu\mu} \; (\nu \lessgtr \mu) \text{ ist.}$$

[illegible] a. S. 114.

[illegible] 14.

[illegible] [Aus]gleichsrechnungen in geschlossenen Leitungs[netz]en ... ETZ 1905, S. 1069.

So entsteht z. B. aus der zweiten Gleichung unseres Beispiels auf S. 118, wenn wir die Gleichungen (136) einsetzen, die neue Gleichung

$$-147{\cdot}58\,\varepsilon_0' - 47{\cdot}62\,\varepsilon_1' + 338{\cdot}04\,\varepsilon_2' - 142{\cdot}84\,\varepsilon_3' = 100$$

und ebenso ist für die neu zu bildende Gleichung der Koeffizient von ε_2' $-147{\cdot}58$, da $-47{\cdot}62 + 338{\cdot}04 - 142{\cdot}84 - 147{\cdot}58 = 0$ ist.

Wiewohl also die Zahl der Unbekannten um eine vermehrt ist, wird doch bei gleicher Bequemlichkeit der Rechnung die Konvergenz energischer, und zwar deswegen, weil der Näherungswert der neuen Unbekannten ε_0' — wie auch an dem folgenden Beispiel leicht zu ersehen ist — infolge der Gleichung (136) zugleich allen übrigen ε zu gute kommt.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil ergiebt sich aus der neuen Gleichungsform für die Kontrolle der Rechnung. Denn da sowohl die Summe der Koeffizienten jeder Unbekannten als auch die Summe der rechten Gleichungsseiten Null ergiebt, da ferner bei jeder durch die Näherungsrechnung bedingten Operation die Koeffizienten einer Unbekannten multipliziert mit demselben Faktor, also wieder eine Zahlenreihe, die zur Summe Null ergiebt, abgezogen wird, so muss jede der neuen J-Reihen wiederum als Summe Null ergeben. Es kann also ohne weiteres bei jeder Zahlenreihe die Kontrolle durch einfache Addition der neuen Reihe oder auch nur der letzten Ziffern derselben erfolgen, ohne dass, wie früher, vorher genaue Multiplikationen auszuführen wären.

Wie aus dem folgenden Beispiel ersichtlich, bedeutet die Einführung der Unbekannten ε_0' nichts weiter, als die Einführung der vereinigten äquipotentiellen Speisepunkte als neuer Knotenpunkt, dessen Belastung der gesamte dem Netz zuzuführende und daher negativ zu nehmende Strom bildet. Die Grösse g_{00}, nämlich der Koeffizient von ε_0' in der neu zu bildenden Gleichung, ist die Summe der Leitfähigkeiten der von sämtlichen Speisepunkten ausgehenden Verteilungsleiter, während die Koeffizienten der ε_ν', nämlich $g_{0\nu}$, die Leitfähigkeit der Verbindung des ν^{ten} Knotenpunktes mit den Speisepunkten bedeuten.

Beispiel. Wir bilden nach dem Vorhergehenden die neuen Gleichungen aus dem Gleichungssystem unseres Beispiels auf S. 118 und erhalten:

$$\begin{array}{rrrrrcr}
625{\cdot}22\,\varepsilon_0' & -221{\cdot}26\,\varepsilon_1' & -147{\cdot}58\,\varepsilon_2' & -71{\cdot}42\,\varepsilon_3' & -184{\cdot}96\,\varepsilon_4' & = & -400\\
-221{\cdot}26\,\varepsilon_0' & +268{\cdot}88\,\varepsilon_1' & -47{\cdot}62\,\varepsilon_2' & & & = & 100\\
-147{\cdot}58\,\varepsilon_0' & -47{\cdot}62\,\varepsilon_1' & +338{\cdot}04\,\varepsilon_2' & -142{\cdot}84\,\varepsilon_3' & & = & 100\\
-71{\cdot}42\,\varepsilon_0' & & -142{\cdot}84\,\varepsilon_2' & +320{\cdot}90\,\varepsilon_3' & -106{\cdot}64\,\varepsilon_4' & = & 100\\
-184{\cdot}96\,\varepsilon_0' & & & -106{\cdot}64\,\varepsilon_3' & +291{\cdot}60\,\varepsilon_4' & = & 100.
\end{array}$$

Die Summe sowohl der rechten Seiten als der Koeffizienten der Unbekannten ist dem Bildungsgesetz nach gleich Null; die letzteren sind die oben definierten Leitfähigkeiten der Speisepunkte. Von der Einführung eines Näherungswertes können wir bei diesem Verfahren ganz absehen, da ja ε_0' die Rolle dieses Näherungswertes spielt, es sei denn, dass bereits genauere Näherungswerte infolge vorher ausgeführter Rechnungen bekannt sind. Solche Näherungswerte wird man stets zur Verkleinerung der rechten Seiten des gegebenen Gleichungssystems verwenden, da dies selbstverständlich die Rechnung wesentlich kürzt. Hier nehmen wir an, dass keine genauen Näherungs-

werte vorhanden sind, um dieses Verfahren mit dem früheren GAUSSschen vergleichen zu können.

Der grösste (absolute) Wert ist der für J_0; wir führen also als erste Annäherung den Wert

$$-\frac{400}{625{\cdot}22} = -0{\cdot}6$$

für ε_0 ein u. s. w., und erhalten endlich gemäss Gleichung (136) die einzelnen Unbekannten als Summe der Annäherungen algebraisch vermindert um den schliesslichen Wert von ε'_0. Die Rechnung giebt die Werte der folgenden Tabelle VIII.

Tabelle VIII.

	ε_0'	ε_1'	ε_2'	ε_3'	ε_4'	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4
1	— 0·6	—	—	—	—	— 40000	10000	10000	10000	10000
2	—	—	—	0·2	—	— 2487	— 3276	1145	5715	— 1097
3	—	—	0·1	—	—	— 1059	— 3276	4002	— 703	1036
4	—	— 0·1	—	—	—	417	— 2800	622	725	1036
5	— 0·03	—	—	—	—	— 1796	— 111	146	725	1036
6	—	— 0·03	—	—	—	80	— 775	— 297	511	481
7	—	—	—	—	0·02	— 584	32	— 440	511	481
8	—	—	—	0·02	—	— 214	32	— 440	724	— 102
9	—	—	— 0·005	—	—	— 71	32	— 154	82	111
10	—	—	—	—	0·004	— 145	8	15	11	111
11	—	—	—	0·002	—	— 71	8	15	53	— 5
	— 0·630	— 0·130	0·095	0·222	0·024	— 57	8	44	— 11	16
	$-\varepsilon_0' =$	+ 0·630	0·630	0·630	0·630					
		0·500	0·725	0·852	0·654					

Nach der elften Reihe konnte die Rechnung abgebrochen werden, da die Reste, dividiert durch ihre Diagonalkoeffizienten, nur noch 0·001 oder weniger betragen. Wir erhalten also die gleichen Werte für die Unbekannten wie früher, und zwar bereits nach zehn Annäherungen (gegen vierzehn des früheren Verfahrens), während zugleich die besonderen Kontrollrechnungen fortfallen. Mehr noch zeigen sich die Vorteile der letzten Methode bei einer grösseren Zahl von Unbekannten, da sich dann die Anzahl der auszuführenden Näherungsrechnungen, besonders bei geringer Konvergenz der Näherungswerte, viel mehr vermindert.

83. Verfahren von Verhoeckx.

Hatte das GAUSSsche Verfahren der Auflösung des Gleichungssystems (XXVII) durch allmähliche Annäherung an die wahren Werte der Unbekannten die Bedingung zur Voraussetzung, dass in der Determinante des Systems

$$g_{\nu\nu} > \Sigma g_{\mu\nu} \left(\mu \gtrless \nu\right)$$

ist, so stützt sich die von P. M. VERHOECKX[1]) angegebene Methode der schrittweisen Einführung der Knotenpunkte (bezw. der Unbekannten) auf die

1) S. Fussnote 2, S. 115.

Eigenschaft der Determinante, symmetrisch zur Hauptdiagonalreihe zu sein, also dass

$$g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}.$$

Die Methode zeigt, wie aus einem Netz mit n-Knotenpunkten, dessen Stromverteilung unter der Annahme bekannt ist, dass die übrigen Kreuzungspunkte Speisepunkte sind, d. h. also, dass die übrigen Unbekannten ε gleich Null sind, die Stromverteilung für $n + 1$ Knotenpunkte gefunden wird. Sie geht also vom einfachsten Problem, der Berechnung des Spannungsverlustes für nur einen Knotenpunkt, aus und vermehrt schrittweise die Anzahl der Knotenpunkte, indem sie einen nach dem andern wieder des Charakters eines Speisepunktes entkleidet, und zwar durch Aufstellung einfacher Beziehungen zwischen den bekannten Leitfähigkeiten des gegebenen Netzes und den durch die vorhergehende Lösung erhaltenen Widerstandswerten gewisser Leiterverbindungen.

Die Lösung unseres allgemeinen Gleichungssystemes für ein Leitungsnetz, Gleichung (XXVII) [76], war gegeben durch die Gleichung (128):

$$\varepsilon_\nu = \frac{\sum\limits_{\mu=1}^{n} D_{\mu\nu} J_\mu}{D} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (128)$$

wo D und $D_{\mu\nu}$ die dort definierte Bedeutung besitzen. Nun haben die Quotienten $\frac{D_{\mu\nu}}{D}$ offenbar die Dimension einer reziproken Leitfähigkeit, da ja D vom n^{ten} Grade, $D_{\mu\nu}$ dagegen nur vom $n - 1^{\text{ten}}$ Grade ist, sie stellen also Widerstände dar. Wir können daher das Gleichungssystem (128) auch in folgender Weise schreiben, wenn wir

$$\frac{D_{\mu\nu}}{D} = \varrho_{\mu\nu}$$

setzen:

$$\left.\begin{array}{l}
\varepsilon_1 = \varrho_{11} J_1 + \varrho_{12} J_2 + \cdots + \varrho_{1\nu} J_\nu + \cdots + \varrho_{1n} J_n \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
\varepsilon_\nu = \varrho_{\nu 1} J_1 + \varrho_{\nu 2} J_2 + \cdots + \varrho_{\nu\nu} J_\nu + \cdots + \varrho_{\nu n} J_n \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
\varepsilon_n = \varrho_{n1} J_1 + \varrho_{n2} J_2 + \cdots + \varrho_{n\nu} J_\nu + \cdots + \varrho_{nn} J_n
\end{array}\right| \quad . \quad (137)$$

Die Determinante dieses Gleichungssystems, die wir mit R bezeichnen, ist gleichfalls symmetrisch zur Hauptdiagonale, also

$$\varrho_{\mu\nu} = \varrho_{\nu\mu},$$

da aus der entsprechenden Bedingung für D unmittelbar folgt, dass

$$D_{\mu\nu} = D_{\nu\mu}$$

ist.

Das Gleichungssystem (137) lässt die physikalische Bedeutung der ϱ deutlich erkennen. Lassen wir nämlich

$$J_2 = J_3 = \cdots = J_n = 0$$

werden, dagegen

$$J_1 = 1,$$

so wird

$$\varrho_{11} = \varepsilon_1 ; \ \varrho_{21} = \varepsilon_2 \cdots \varrho_{\nu 1} = \varepsilon_\nu \cdots \varrho_{n 1} = \varepsilon_n ;$$

also $\varrho_{\nu 1}$ stellt den Spannungsverlust im Knotenpunkt ν dar, wenn nur der erste Knotenpunkt mit der Stromeinheit, bezw. den Spannungsverlust im Knotenpunkt 1, wenn nur der ν^{te} Knotenpunkt mit der Stromeinheit belastet wird. Ähnlich ist $\varrho_{\mu\nu} = \varrho_{\nu\mu}$ der Spannungsverlust im Knotenpunkt μ (ν), wenn nur der Knotenpunkt ν (bezw. μ) mit der Stromeinheit belastet ist. Ist nun die Belastung eines Knotenpunktes nicht 1, sondern J, so sind die Spannungsverluste offenbar der Belastung proportional. Werden schliesslich die verschiedenen Einzelbelastungen der Knotenpunkte superponiert, so entsteht das Gleichungssystem (137), das die der thatsächlichen Netzbelastung entsprechenden Spannungsverluste darstellt.

Hieraus aber geht hervor, dass die Darstellung der Knotenpunktsspannungsverluste in der Form der Gleichungen (137) die allgemeinste Lösung für die Berechnung von Netzen vermittelt, da wir auf die wirkliche Belastung der Knotenpunkte überhaupt keine Rücksicht zu nehmen brauchen, sondern das Netz bezw. die Grössen ϱ nur für irgend eine Einheitsbelastung (1, 100 oder 1000 Amp.) zu berechnen haben, um die gesuchten Spannungsverluste für bestimmte oder auch variable Knotenpunktsbelastungen [86] durch einfache Summation der Produkte ϱJ zu erhalten.

Eine bequeme Bestimmung der ϱ giebt nun der folgende Weg:

Wir bilden das Produkt der beiden Determinanten D und R in Form einer neuen Determinante von n^2 Gliedern, was bekanntlich dadurch bewerkstelligt wird, dass jedes Glied einer Reihe oder einer Säule von D mit dem entsprechenden Gliede je einer Reihe oder Säule von R multipliziert und die Produkte addiert werden. Wir erhalten so n^2 Summen, die die Glieder der neuen Determinante bilden. Die k^{te} Säule derselben z. B., die aus der Summe der Produkte aller Reihen oder Säulen von D mit der k^{ten} Reihe oder Säule von R erhalten wird, hat also die Form:

$$\left.\begin{array}{l}
g_{11}\varrho_{k1} - g_{12}\varrho_{k2} - \cdots - g_{1k}\varrho_{kk} - \cdots - g_{1n}\varrho_{kn} \\
-g_{21}\varrho_{k1} + g_{22}\varrho_{k2} - \cdots - g_{2k}\varrho_{kk} - \cdots - g_{2n}\varrho_{kn} \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
-g_{k1}\varrho_{k1} - g_{k2}\varrho_{k2} - \cdots + g_{kk}\varrho_{kk} - \cdots - g_{kn}\varrho_{kn} \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
-g_{n1}\varrho_{k1} - g_{n2}\varrho_{k2} - \cdots - g_{nk}\varrho_{kk} - \cdots + g_{nn}\varrho_{kn}
\end{array}\right\} \quad (138)$$

In diesen Polynomen stellen die $\varrho_{k\nu}$, wie oben gezeigt, die Spannungsverluste ε_ν dar für den Fall, dass nur der k^{te} Knotenpunkt mit 1 Amp. belastet wird. Unter dieser Bedingung werden die Polynome identisch mit den linken Seiten der Gleichungen (XXVII), deren rechte Seiten dann sämtlich verschwinden mit Ausnahme derjenigen der k^{ten} Gleichung, die den Wert 1 annimmt. Das Gleiche geschieht aber mit allen andern Säulen, wenn nur der der Kennziffer der Säule entsprechende Knotenpunkt mit 1 Amp. belastet wird, während alle andern Knotenpunkte unbelastet bleiben. Wir erhalten

also durch die Multiplikation von D und R n^2 Gleichungen zwischen den bekannten g und den unbekannten ϱ, die die letzteren zu berechnen gestatten. Mit VERHOECKX stellen wir diese n^2-Gleichungen symbolisch in der folgenden Weise dar:

$$D\,R = \begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1n} \\ -g_{21} & g_{22} & \cdots & -g_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & g_{nn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varrho_{11} & \varrho_{12} & \cdots & \varrho_{1n} \\ \varrho_{21} & \varrho_{22} & \cdots & \varrho_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \varrho_{n1} & \varrho_{n2} & \cdots & \varrho_{nn} \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix} \quad (139)$$

und verstehen diese symbolische Bezeichnung so, dass jedes der durch die Multiplikation der Determinanten entstehende Polynom dem entsprechenden Gliede der auf der rechten Seite stehenden Determinante gleich ist.

84. Fortsetzung. Ableitung der Lösung für n Knotenpunkte aus der für $n-1$ Knotenpunkte.

Machen wir nun den n^{ten} Knotenpunkt zu einem Speisepunkt, so wird $\varepsilon_n = 0$ und die n^{te} Reihe wie die n^{te} Säule der Determinanten D und R fallen fort. Wir erhalten also:

$$D'\,R' \equiv \begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1,n-1} \\ -g_{12} & g_{22} & \cdots & -g_{2,n-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{n-1,1} & -g_{n-1,2} & \cdots & g_{n-1,n-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varrho_{11} & \varrho_{12} & \cdots & \varrho_{1,n-1} \\ \varrho_{21} & \varrho_{22} & \cdots & \varrho_{2,n-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \varrho_{n-1,1} & \varrho_{n-1,2} & \cdots & \varrho_{n-1,n-1} \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{vmatrix} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (140)$$

Das Verfahren besteht nun darin, zu zeigen, wie aus der „Lösung für $n-1$ Knotenpunkte", d. h. wenn die Werte der $\varrho_{\mu\nu}$ für $n-1$ Knotenpunkte bekannt und etwa gleich $a_{\mu\nu}$ sind, die Lösung für n Knotenpunkte gefunden wird, wenn also der n^{te} Kreuzungspunkt wieder seines Charakters als Speisepunkt entkleidet und zum Knotenpunkt gemacht wird.

Zu diesem Zwecke erweitern wir die Determinante D' durch die bekannten Leitfähigkeiten des n^{ten} Knotenpunktes, die Determinante R' mit ihren bekannten Werten $a_{\mu\nu}$ aber durch eine Reihe und eine Säule von Nullen zu Determinanten n^{ten} Grades. Wir erhalten so ein Gleichungssystem von n^2 Identitäten:

$$\begin{vmatrix} g_{11} & -g_{12} & \cdots & -g_{1,n-1} & -g_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -g_{n-1,1} & -g_{n-1,2} & \cdots & g_{n-1,n-1} & -g_{n-1,n} \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & -g_{n,n-1} & g_{nn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1,n-1} & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ -b_{n1} & -b_{n2} & \cdots & -b_{n,n-1} & 0 \end{vmatrix} \quad \ldots\ldots \quad (141)$$

wo

$$\left.\begin{array}{l} b_{n1} \equiv g_{n1}\, a_{11} \quad + g_{n2}\, a_{12} \quad + \cdots + g_{n,n-1}\, a_{1,n-1} \\ b_{n2} \equiv g_{n1}\, a_{21} \quad + g_{n2}\, a_{22} \quad + \cdots + g_{n,n-1}\, a_{2,n-1} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ b_{n,n-1} \equiv g_{n1}\, a_{n-1,1} + g_{n2}\, a_{n-1,2} + \cdots + g_{n,n-1}\, a_{n-1,n-1} \end{array}\right\} \quad (142)$$

oder symbolisch

$$\left|\begin{array}{c} g_{n1} \\ \cdots \\ g_{n\nu} \\ \cdots \\ g_{n,n-1} \end{array}\right| \left|\begin{array}{ccc} a_{11} & \cdots & a_{1,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{\nu 1} & \cdots & a_{\nu,n-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n-1,1} & \cdots & a_{n-1,n-1} \end{array}\right| \equiv \left|\begin{array}{c} b_{n1} \\ \cdots \\ b_{n\nu} \\ \cdots \\ b_{n,n-1} \end{array}\right| \quad . \quad . \quad (142\,\mathrm{a})$$

aus den bekannten $g_{n\nu}$ und den $a_{\mu\nu}$ der Lösung für $n-1$ Knotenpunkte berechnet wird.

Subtrahieren wir das Gleichungssystem (141) von (139), so erhalten wir:

$$D \cdot \left|\begin{array}{ccccc} \varrho_{11} - a_{11}, & \varrho_{12} - a_{12} & \cdots & \varrho_{1,n-1} - a_{1,n-1}, & \varrho_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \varrho_{n-1,1} - a_{n-1,1}, & \varrho_{n-1,2} - a_{n-1,2} & \cdots & \varrho_{n-1,n-1} - a_{n-1,n-1}, & \varrho_{n-1,n} \\ \varrho_{n1} & \varrho_{n2} & \cdots & \varrho_{n,n-1} & \varrho_{nn} \end{array}\right|$$

$$= \left|\begin{array}{ccccc} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{n,n-1} & 1 \end{array}\right| \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (143)$$

also n^2 Gleichungen zwischen den n^2 Unbekannten $\varrho_{\mu\nu}$ und den bekannten Grössen g, a und b, aus denen die ersteren sich in folgender Weise ergeben:

Wir multiplizieren die Gleichungen des Systems (142) der Reihe nach mit $g_{11}, -g_{12}, \cdots - g_{1,n-1}$ und addieren, so folgt:

$$\begin{aligned} g_{11}\, b_{n1} - g_{12}\, b_{n2} - \cdots - g_{1,n-1}\, b_{n,n-1} \\ = g_{n1} \quad & (g_{11}\, a_{11} \quad - g_{12}\, a_{21} \quad - \cdots - g_{1,n-1}\, a_{n-1,1}) \\ + g_{n2} \quad & (g_{11}\, a_{12} \quad - g_{12}\, a_{22} \quad - \cdots - g_{1,n-1}\, a_{n-1,2}) \\ + \cdots & \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ + g_{n,n-1} & (g_{11}\, a_{1,n-1} - g_{12}\, a_{2,n-1} - \cdots - g_{1,n-1}\, a_{n-1,n-1}) \\ = g_{n1}, & \end{aligned}$$

denn nach (140) oder (141) ist der Ausdruck in der ersten Klammer $= 1$, während die übrigen Klammerpolynome verschwinden. Weitere $n-1$ Gleichungen erhalten wir durch Multiplikation von (142) mit der zweiten bis n^{ten} Reihe der Determinante D und nachfolgende Addition, und zwar können wir diese n Gleichungen symbolisch zusammenfassen in den folgenden Ausdruck:

$$D \cdot \begin{vmatrix} b_{n1} \\ b_{n2} \\ \cdots \\ b_{n,n-1} \\ 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ c_n \end{vmatrix} \quad \ldots \ldots \quad (144)$$

wenn wir setzen:

$$-g_{n1} b_{n1} - g_{n2} b_{n2} - \cdots - g_{n,n-1} b_{n,n-1} + g_{nn} = c_n \,. \quad (145)$$

Dividieren wir schliesslich die Gleichungen (143) links und rechts durch $b_{n1} \cdot b_{n2} \cdots b_{n,n-1}$, ferner das System (144) durch c_n, so erhalten wir:

$$D \cdot \begin{vmatrix} \frac{\varrho_{11} - a_{11}}{b_{n1}} & \frac{\varrho_{12} - a_{12}}{b_{n2}} & \cdots & \frac{\varrho_{1,n-1} - a_{1,n-1}}{b_{n,n-1}} & \varrho_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\varrho_{n-1,1} - a_{n-1,1}}{b_{n1}} & \frac{\varrho_{n-1,2} - a_{n-1,2}}{b_{n2}} & \cdots & \frac{\varrho_{n-1,n-1} - a_{n-1,n-1}}{b_{n,n-1}} & \varrho_{n-1,n} \\ \frac{\varrho_{n1}}{b_{n1}} & \frac{\varrho_{n2}}{b_{n2}} & & \frac{\varrho_{n,n-1}}{b_{n,n-1}} & \varrho_{nn} \end{vmatrix}$$

$$= \begin{vmatrix} 0\; 0 \cdots 0\; 0 \\ \cdots\cdots \\ 0\; 0 \cdots 0\; 0 \\ 1\; 1 \cdots 1\; 1 \end{vmatrix} \quad \ldots \ldots \quad (143\text{a})$$

und

$$D \cdot \begin{vmatrix} \frac{b_{n1}}{c_n} \\ \cdots \\ \frac{b_{n,n-1}}{c_n} \\ \frac{1}{c_n} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ \cdots \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad \ldots \ldots \quad (144\text{a})$$

Hieraus ist aber unmittelbar durch Vergleich zu ersehen, dass

$$\frac{\varrho_{11} - a_{11}}{b_{n1}} = \frac{\varrho_{12} - a_{12}}{b_{n2}} = \cdots = \frac{\varrho_{1,n-1} - a_{1,n-1}}{b_{n,n-1}} = \varrho_{1n} = \frac{b_{n1}}{c_n}$$

$$\frac{\varrho_{21} - a_{21}}{b_{n1}} = \frac{\varrho_{22} - a_{22}}{b_{n2}} = \cdots = \frac{\varrho_{2,n-1} - a_{2,n-1}}{b_{n,n-1}} = \varrho_{2n} = \frac{b_{n2}}{c_n}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$\frac{\varrho_{n-1,1} - a_{n-1,1}}{b_{n1}} = \frac{\varrho_{n-1,2} - a_{n-1,2}}{b_{n2}} = \cdots = \frac{\varrho_{n-1,n-1} - a_{n-1,n-1}}{b_{n,n-1}} = \varrho_{n-1,n} = \frac{b_{n,n-1}}{c_n}$$

$$\frac{\varrho_{n1}}{b_{n1}} = \frac{\varrho_{n2}}{b_{n2}} = \cdots = \frac{\varrho_{n,n-1}}{b_{n,n-1}} = \varrho_{nn} = \frac{1}{c_n},$$

woraus sich die ϱ ergeben zu:

$$\left.\begin{array}{l}
\varrho_{11} = a_{11} + \frac{b^2_{n1}}{c_n}; \\
\varrho_{12} = \varrho_{21} = a_{12} + \frac{b_{n1}\, b_{n2}}{c_n}; \cdots \varrho_{1\nu} = \varrho_{\nu 1} = a_{1\nu} + \frac{b_{n1} b_{n\nu}}{c_n}; \cdots \varrho_{1n} = \varrho_{n1} = \frac{b_{n1}}{c_n} \\
\varrho_{22} = a_{22} + \frac{b^2_{n2}}{c_n}; \cdots \varrho_{2\nu} = \varrho_{\nu 2} = a_{2\nu} + \frac{b_{n2} b_{n\nu}}{c_n}; \cdots \varrho_{2n} = \varrho_{n2} = \frac{b_{n2}}{c_n} \\
\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\varrho_{\nu\nu} = a_{\nu\nu} + \frac{b^2_{n\nu}}{c_n}; \cdots \varrho_{\nu n} = \varrho_{n\nu} = \frac{b_{n\nu}}{c_n} \\
\cdots\cdots \\
\varrho_{nn} = \frac{1}{c_n}
\end{array}\right\} \quad (146)$$

85. Fortsetzung. Gang der Rechnung.

Der Gang der Rechnung ist folgender: Wir beginnen mit einem Knotenpunkte, indem wir alle andern als Speisepunkte betrachten, setzen also $n = 1$. Dann wird

$$\varrho_{nn} = \varrho_{11} = \frac{1}{c_1} = \frac{1}{g_{11}} = a_{11}.$$

Nehmen wir nun den zweiten Knotenpunkt hinzu, d. h. setzen wir $n = 2$, so wird nach Gleichung (142a)

$$| g_{21} \| a_{11} | = | b_{21} |, \text{ also } b_{21} = g_{21}\, a_{11}$$

und nach (145)

$$- g_{21}\, b_{21} + g_{22} = c_2,$$

so dass die Gleichungen (146) ergeben:

$$\varrho_{11} = a_{11} + \frac{b^2_{21}}{c_2}; \quad \varrho_{12} = \frac{b_{21}}{c_2}$$
$$\varrho_{22} = \frac{1}{c_2}.$$

Für den dritten Knotenpunkt ($n = 3$) erhalten wir in gleicher Weise:

$$\begin{vmatrix} g_{31} \\ g_{32} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_{31} \\ b_{32} \end{vmatrix}$$

also

$$b_{31} = g_{31}\, a_{11} + g_{32}\, a_{12}; \quad b_{32} = g_{31}\, a_{12} + g_{32}\, a_{22}$$
$$c_3 = - g_{31}\, b_{31} - g_{32}\, b_{32} + g_{33}$$
$$\varrho_{11} = a_{11} + \frac{b^2_{31}}{c_3}; \quad \varrho_{12} = a_{12} + \frac{b_{31}\, b_{32}}{c_3}; \quad \varrho_{13} = \frac{b_{31}}{c_3}$$
$$\varrho_{22} = a_{22} + \frac{b^2_{32}}{c_3}; \quad \varrho_{23} = \frac{b_{32}}{c_3}$$
$$\varrho_{33} = \frac{1}{c_3},$$

wo nunmehr die a durch die letztermittelten ϱ-Werte vertreten werden u. s. w.

Die schliesslichen Werte der Spannungsverluste ε werden durch die Gleichungen (137) ermittelt, die zu gleicher Zeit eine Kontrolle für die Richtigkeit der Rechnung auf jeder Stufe ermöglichen, da ja für

$$J_1 = J_2 = \cdots = J_n = 1$$

(oder auch bequemer für $J = 100$ oder 1000 je nach der angestrebten Genauigkeit)

$$\varepsilon_\nu = \varrho_{\nu 1} + \varrho_{\nu 2} + \cdots + \varrho_{\nu n} \quad (\nu = 1, 2 \cdots n)$$

berechnet und in die Gleichungen (XXVII) eingesetzt, diese erfüllen müssen.

86. Netzkontrolle. Bei in Betrieb befindlichen Netzen, deren Belastung naturgemäss in doppelter Weise fortwährenden Änderungen unterworfen ist, nämlich dadurch, dass einerseits zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten ein verschieden grosser Teil der angeschlossenen Lampen zugleich brennt, andererseits die Anzahl der angeschlossenen Lampen selbst sich dauernd vermehrt, ist eine ständige Kontrolle der maximalen Spannungsverluste und der Leiterbelastungen erforderlich, um sowohl Überlastungen des Querschnitts als auch eine unzulässige Grösse der Spannungsschwankungen [5] zu vermeiden. Es sind also dauernd Neuberechnungen der Spannungsverluste bei verschiedenen Belastungen, die möglichst durch unmittelbare Strommessung an verschiedenen Stellen des Netzes zu ermitteln sind, vorzunehmen, eine Arbeit, die sich vermittels der Gleichungen (137) sehr einfach gestaltet, wenn einmal die Grössen ϱ für das Netz festgelegt sind.

Beispiel. Als Beispiel berechnen wir das auf S. 119 skizzierte Netz nach dieser Methode, und zwar wie bisher zunächst für die Einheitsbelastung von 100 Amp. in jedem Knotenpunkt. Die Leitfähigkeiten des Netzes sind:

$$\begin{array}{llll} g_{11} = 268{\cdot}88 & g_{12} = 47{\cdot}62 & g_{13} = 0 & g_{14} = 0 \\ & g_{22} = 338{\cdot}04 & g_{23} = 142{\cdot}84 & g_{24} = 0 \\ & & g_{33} = 320{\cdot}90 & g_{34} = 106{\cdot}64 \\ & & & g_{44} = 291{\cdot}60 \end{array}$$

Für den Knotenpunkt 1 wird

1. $\varrho_{11} = \dfrac{1}{g_{11}} = 0{\cdot}00372_5.$

Ferner erhalten wir nach stufenweiser Hinzufügung der Knotenpunkte 2, 3 und 4:

2. $b_{21} = 0{\cdot}177_2;\ c_2 = 329{\cdot}6$
$\varrho_{11} = 0{\cdot}00382;\ \varrho_{12} = 0{\cdot}000538;\ \varrho_{22} = 0{\cdot}00304.$

3. $b_{31} = 0{\cdot}0767;\ b_{32} = 0{\cdot}434;\ c_3 = 258{\cdot}9_8$
$\varrho_{11} = 0{\cdot}00384;\ \varrho_{12} = 0{\cdot}000666;\ \varrho_{13} = 0{\cdot}000296$
$\varrho_{22} = 0{\cdot}00376;\ \varrho_{23} = 0{\cdot}00167_4;\ \varrho_{33} = 0{\cdot}00386.$

4. $b_{41} = 0{\cdot}0316;\ b_{42} = 0{\cdot}178_4;\ b_{43} = 0{\cdot}411_5;\ c_3 = 247{\cdot}6_5$

$$\begin{array}{llll} \varrho_{11} = 0{\cdot}00384; & \varrho_{12} = 0{\cdot}000689; & \varrho_{13} = 0{\cdot}000348; & \varrho_{14} = 0{\cdot}000128. \\ & \varrho_{22} = 0{\cdot}00389; & \varrho_{23} = 0{\cdot}00197; & \varrho_{24} = 0{\cdot}000721. \\ & & \varrho_{33} = 0{\cdot}00454; & \varrho_{34} = 0{\cdot}00166_2. \\ & & & \varrho_{44} = 0{\cdot}00404. \end{array}$$

Die Spannungsverluste in den Knotenpunkten sind also für

$$J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = 100 \text{ Amp.:}$$

$\varepsilon_1 =$	$\varepsilon_2 =$	$\varepsilon_3 =$	$\varepsilon_4 =$
0·384	0·069	0·035	0·013
0·069	0·383	0·197	0·072
0·035	0·197	0·454	0·166
0·013	0·072	0·166	0·404
0·501	0·727	0·852	0·655

also die gleichen Werte wie früher. Für jede andere Belastung der Knotenpunkte würde sich ergeben:

$$\begin{aligned}
100\,\varepsilon_1 &= 0{\cdot}384\,J_1 + 0{\cdot}0689\,J_2 + 0{\cdot}0348\,J_3 + 0{\cdot}0128\,J_4 \\
100\,\varepsilon_2 &= 0{\cdot}0689\,J_1 + 0{\cdot}389\,J_2 + 0{\cdot}197\,J_3 + 0{\cdot}0721\,J_4 \\
100\,\varepsilon_3 &= 0{\cdot}0348\,J_1 + 0{\cdot}197\,J_2 + 0{\cdot}454\,J_3 + 0{\cdot}166\,J_4 \\
100\,\varepsilon_4 &= 0{\cdot}0128\,J_1 + 0{\cdot}0721\,J_2 + 0{\cdot}166\,J_3 + 0{\cdot}404\,J_4.
\end{aligned}$$

Als Kontrolle erhalten wir vermittels der Gleichungen (XXVII):

$g_{11}\varepsilon_1 = 134{\cdot}6$	$-g_{12}\varepsilon_1 = -23{\cdot}9$	$-g_{23}\varepsilon_2 = -103{\cdot}7$	$-g_{34}\varepsilon_3 = -91{\cdot}1$
$-g_{12}\varepsilon_2 = -34{\cdot}6$	$g_{22}\varepsilon_2 = 245{\cdot}5$	$g_{33}\varepsilon_3 = 274{\cdot}0$	$g_{44}\varepsilon_4 = 191{\cdot}0$
$J_1 = 100{\cdot}0$	$-g_{23}\varepsilon_3 = -121{\cdot}8$	$-g_{34}\varepsilon_4 = -69{\cdot}9$	$J_4 = 99{\cdot}9$
	$J_2 = 99{\cdot}8$	$J_3 = 100{\cdot}2$	

also genügende Übereinstimmung, soweit die Genauigkeit des Rechenschiebers erwarten liess.

Hiermit ist die Berechnung der allgemeinen Stromverteilung des Netzes für eine Belastung der Knotenpunkte mit der Stromeinheit von 100 Amp. beendet. Wir wollen nun noch die der wirklichen Netzbelastung entsprechende Spannungsverteilung ermitteln und an diesem Beispiel das Verfahren der Verlegung der Abzweigströme auf die Knotenpunkte und die Überlagerung der beiden fingierten Stromverteilungen nach Abschnitt [**70**] darlegen.

In Fig. 92 möge diese thatsächliche Belastung dargestellt sein. Den Querschnitten und Längen der Leitungen entsprechen die den vorhergehenden Rechnungen und der Figur 91 zu Grunde gelegten Leitfähigkeiten. Wir ermitteln also die Belastungen der Knotenpunkte, indem wir sämtliche Kreuzungspunkte zu Speisepunkten machen und Gleichung (XXI) [**63**] bezw. (115 a) [**65**] auf alle Abzweigungen anwenden. Wir erhalten so die Stromverteilung Fig. 93 und die Knotenpunktsbelastungen

$$J_1 = 75{\cdot}47; \quad J_2 = 72{\cdot}83; \quad J_3 = 41{\cdot}00; \quad J_4 = 161{\cdot}23.$$

Daher ergeben sich die wahren Spannungsverluste in den Knotenpunkten zu:

0·384 = 29·0	75·47 · 0·0689 = 5·2	75·47 · 0·0348 = 2·6	75·47 · 0·0128 = 1·0
0·0689 = 5·0	72·83 · 0·389 = 28·4	72·83 · 0·197 = 28·7	72·83 · 0·0721 = 5·2
0·0348 = 1·4	41·00 · 0·197 = 8·1	41·00 · 0·454 = 18·6	41·00 · 0·166 = 6·8
0·0128 = 2·1	161·23 · 0·0721 = 11·6	161·23 · 0·166 = 26·8	161·23 · 0·404 = 65·1
37·5	53·3	62·4	78·1
$\varepsilon_1 = 0{\cdot}375$	$\varepsilon_2 = 0{\cdot}533$	$\varepsilon_3 = 0{\cdot}624$	$\varepsilon_4 = 0{\cdot}781$

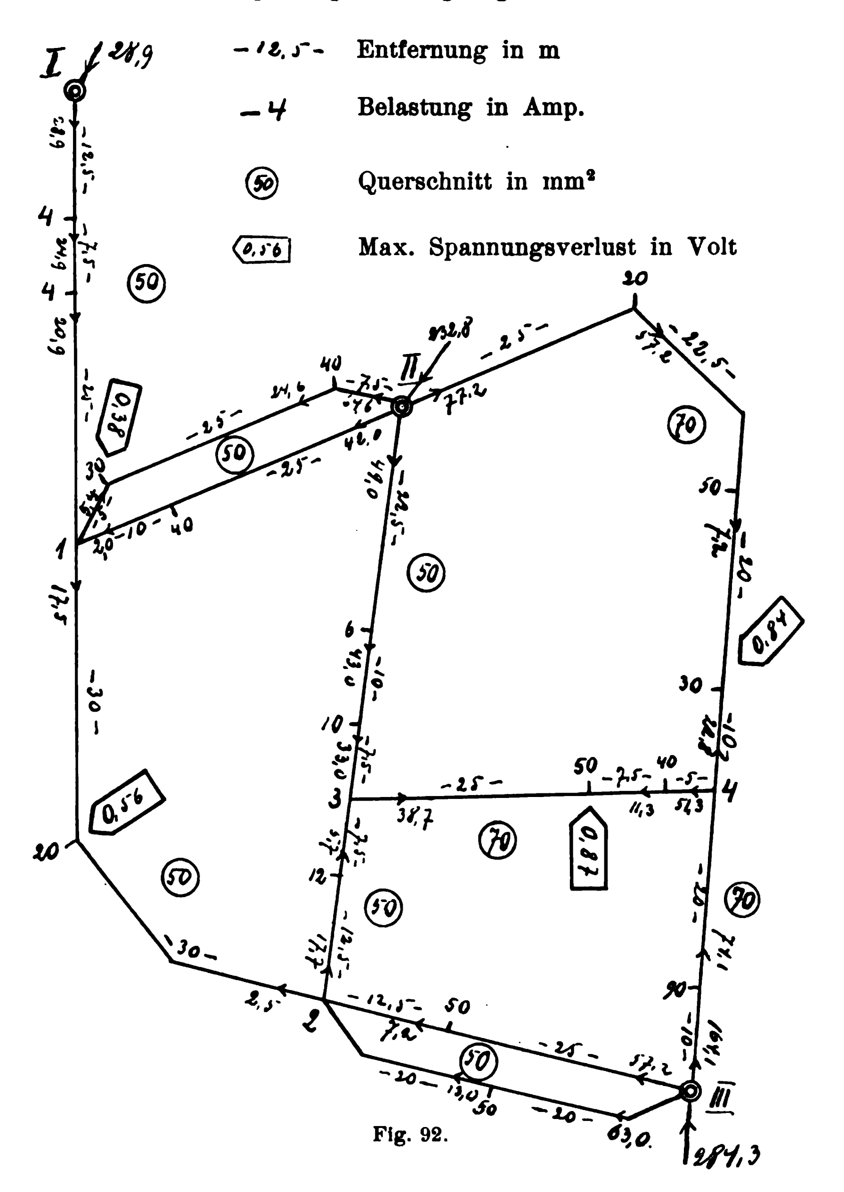


Fig. 92.

und hieraus die den Knotenpunktsbelastungen entsprechenden Leiterströme zu

$$J_{\mu\nu} = \varepsilon_{\mu\nu}\, g_{\mu\nu},$$

also:

$J_{I1} = 0{\cdot}375 \cdot 63{\cdot}48 =$	23·80	$J_{12} =$	7·52
$J_{II1} =$	28·57	$J_{III2} =$	40·55
$J_{II1}' =$	30·60	$J_{III2}' =$	38·00
$J_{21} =$	— 7·52	$J_{32} =$	— 12·99
$J_1 =$	75·45	$J_2 =$	73·08
$J_{23} =$	12·99	$J_{34} =$	16·73
$J_{III3} =$	44·55	$J_{II4} =$	40·40
$J_{43} =$	—16·73	$J_{III4} =$	104·10
$J_3 =$	40·81	$J_4 =$	161·23

g. 94). Als Kontrolle für die Rechnung sind die in den Knotenpunkten ammenlaufenden Ströme addiert; die geringen, aus der Ungenauigkeit der ltiplikation entstandenen Differenzen sind durch entsprechende Änderung der Stromwerte zu entfernen. Durch Überlagerung der Stromverteilungen (Fig. 93 u. 94) erhalten wir schliesslich die wahre Stromverteilung und die daraus sich ergebenden maximalen Spannungsverluste, wie sie in der Fig. 92 dargestellt sind.

Fig. 93.

87. Vergleich zwischen dem Gaussschen und Verhoeckxschen Verfahren.

Wir wollen nun die beiden Verfahren, die die Lösung des Gleichungstems, auf das uns die Spannungsmethode führte, und damit die systetische Berechnung von Leitungsnetzen in ihrer ganzen Ausdehnung, also ıe Zerlegung derselben in einzelne Teile, und daher mit voller Genauigt gestatten, miteinander vergleichen, um ihre Vor- und Nachteile zu erınen. Offenbar sind die Rechenoperationen der Gaussschen Methode einher und, besonders bei ausgedehnteren Netzen, auch kürzer als die des rhoeckxschen Verfahrens, besonders wenn oft zu wiederholende Kontrollhnungen bereits genaue Näherungswerte für die unbekannten Spannungsluste ergeben haben. Ferner ist auch die Kontrolle der Richtigkeit der

Rechnung im ersten Falle wesentlich einfacher und kürzer, da ja bei der VERHOECKXschen Methode zu diesem Zwecke stets die Summen mehrerer Produkte mit erheblicher Genauigkeit aufzustellen sind und, falls sich ein Fehler herausstellt, dieser durch Wiederholung der Rechnung, im ungünstigsten Falle bis zur letzten Kontrolle, ermittelt werden muss. Stellt sich

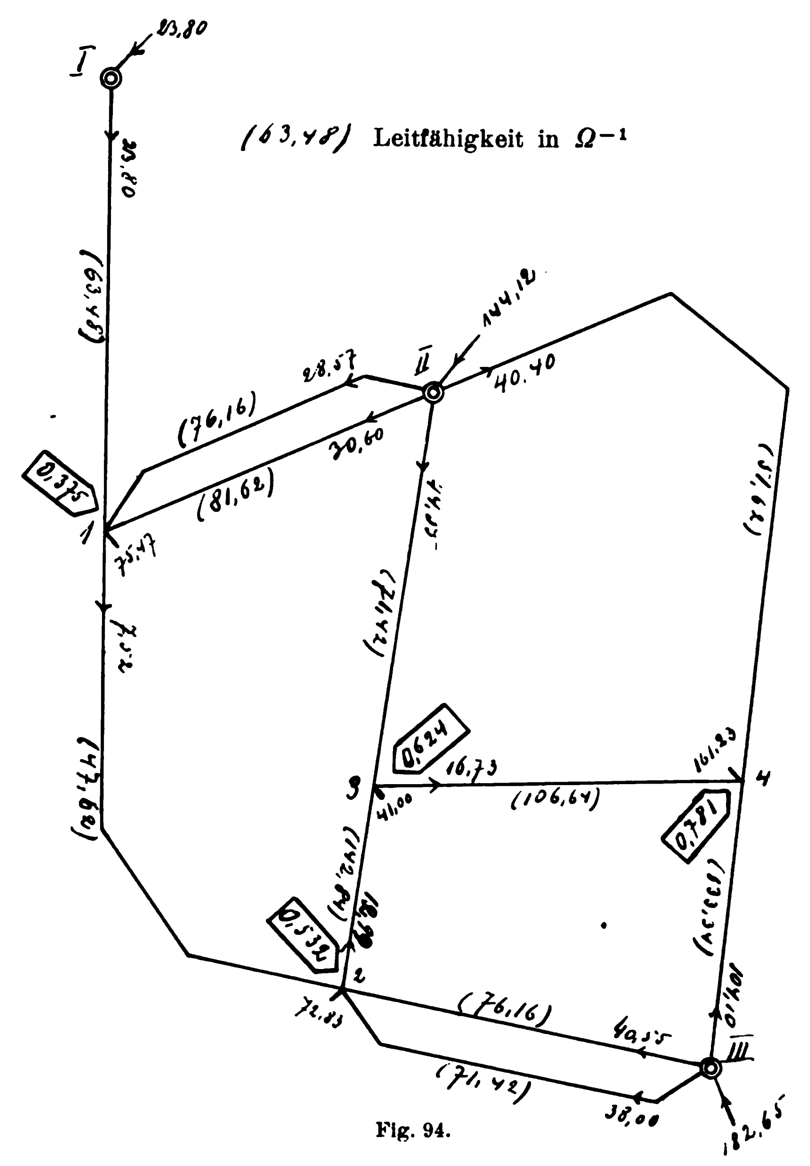


Fig. 94.

weiterhin im Laufe der Rechnung heraus, dass ein Querschnitt geändert werden muss, so müssen bei dem letzten Verfahren sämtliche Rechnungen von dem Punkte an, wo der geänderte Querschnitt zuerst auftrat, ganz von neuem ausgeführt werden, da sich mit einer Leitfähigkeit auch alle anderen von dieser abhängigen Grössen ändern. Bei der GAUSSschen Methode werden dagegen in diesem Falle nur wenige Näherungen zu berechnen sein, da die zuletzt erhaltenen genauen Werte der ε als erste Näherungswerte verwendet

werden können und im allgemeinen durch Änderung des Querschnittes eines oder einiger Kabel nur die Spannungsverluste der nächstliegenden Knotenpunkte sich wesentlich ändern, während die anderen nur wenig oder gar nicht in Mitleidenschaft gezogen werden.

Dagegen ist das Verwendungsgebiet der VERHOECKXschen Methode theoretisch ausgedehnter als das der GAUSSschen; denn die letztere stützt sich auf die Bedingung, dass die Diagonalglieder der Determinante gleich oder grösser sein sollen als die Summe der übrigen (absolut genommenen) Reihenglieder. In Wechselstromnetzen aber setzen sich die Widerstände bezw. die Leitfähigkeiten der Leitungen, wenn Kapazität und Induktivität in Frage kommen, aus zwei Gliedern zusammen, die wir nach dem Früheren [47] in folgender Form schreiben wollen:

$$w = w' + jw''; \quad g = g' + jg''.$$

Dann gehen natürlich ε und J über in

$$\varepsilon' + j\varepsilon'' \quad \text{und} \quad J' + jJ'',$$

und das Gleichungssystem (XXVII) [76] wird demnach lauten:

$$-(g_{\nu 1}' + jg_{\nu 1}'')(\varepsilon_1' + j\varepsilon_1'') - \cdots + (g_{\nu\nu}' + jg_{\nu\nu}'')(\varepsilon_\nu' + j\varepsilon_\nu'') - \cdots$$
$$-(g_{\nu n}' + jg_{\nu n}'')(\varepsilon_n' + j\varepsilon_n'') = J_\nu' + jJ_\nu'' \quad (\nu = 1, 2, \cdots n)$$

oder nach Gleichsetzung des reellen und imaginären Teils:

$$-g_{\nu 1}'\,\varepsilon_1' + g_{\nu 1}''\,\varepsilon_1'' - \cdots + g_{\nu\nu}'\,\varepsilon_\nu' - g_{\nu\nu}''\,\varepsilon_\nu'' - \cdots$$
$$- g_{\nu n}'\,\varepsilon_n' + g_{\nu n}''\,\varepsilon_n'' = J_\nu'$$

$$g_{\nu 1}''\,\varepsilon_1' + g_{\nu 1}'\,\varepsilon_1'' + \cdots - g_{\nu\nu}''\,\varepsilon_\nu' - g_{\nu\nu}'\,\varepsilon_\nu'' + \cdots$$
$$+ g_{\nu n}''\,\varepsilon_n' + g_{\nu n}'\,\varepsilon_n'' = -J_\nu''.$$

Es geht also über in ein System von $2n$ Gleichungen mit $2n$ Unbekannten, dessen Determinante zur Diagonalreihe nach wie vor symmetrisch ist; dagegen ist die Voraussetzung für die Anwendung des GAUSSschen Näherungsverfahrens nicht mehr erfüllt, das letztere versagt also, während die Methode von VERHOECKX auch hier anwendbar bleibt. In der Praxis kommt aber dieser Fall kaum vor, da bei den verhältnismässig geringen Längen der Verteilungskabel geschlossener Netze Induktivität und Kapazität so gering sind, dass die Reaktanz gegen den OHMschen Widerstand nicht in Frage kommt. Anders ist es allerdings, wie wir gesehen haben [60], bei langen Leitungen, bei denen unter Umständen sehr wohl diese Grössen zu berücksichtigen sind.

Ein anderer wesentlicher Vorteil des VERHOECKXschen Verfahrens ist der, dass in den ϱ die Spannungsverluste des in nur einem Knotenpunkte mit der Stromeinheit belasteten Netzes erhalten werden und man daher mittels Gleichung (137) die Spannungsverluste bei allen anderen Belastungen ermitteln kann. Eine derartige Rechnung mit veränderlichen Stromabnahmen muss z. B. bei in Betrieb befindlichen Netzen [86] häufig vorgenommen werden, um den Einfluss von Belastungsänderungen des Netzes — etwa

durch Anschluss neuer Abnehmer oder dgl. — kennen zu lernen. Wollte man diese Grössen ϱ nach der GAUSSschen Methode ermitteln, so müsste die gesamte Rechnung so oft durchgeführt werden als Knotenpunkte vorhanden sind, indem stets nur ein Knotenpunkt mit der Einheit belastet würde, woraus ohne weiteres die Überlegenheit des VERHOECKXschen Verfahrens für diesen Fall erhellt.

Man kann also sagen: Für neu zu berechnende, zu projektierende Netze ist die Lösung der Gleichungen nach dem GAUSSschen Verfahren, für im Betrieb zu kontrollierende Netze ist die Lösung nach dem VERHOECKXschen Verfahren vorteilhafter.

Netzberechnung durch schrittweise Vereinfachung des Netzes.

88. Methode der widerstandstreuen Netzumbildung. (Frick-Kenelly.)

Wir wenden uns nunmehr zu einem anderen Verfahren, die Stromverteilung in Netzen zu bestimmen, das nicht sowohl auf der Aufstellung und Auflösung eines Systems von Gleichungen als vielmehr auf einer schrittweisen Zurückführung der komplizierten Leiterverbindungen des Netzes auf

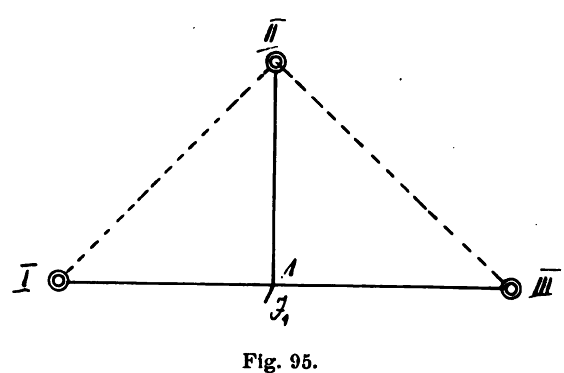


Fig. 95.

einfache Gebilde beruht, und daher, wenn auch in anderer Richtung, gleiche Ziele verfolgt, wie das VERHOECKXsche Verfahren. Es ist die Methode der „widerstandstreuen Netzumbildung“,[1]) die zuerst von OTTO FRICK[2]) veröffentlicht und später von KENELLY[3]) und HERZOG-FELDMANN[1]) weiter ausgebildet worden ist.

89. Zweieck-Umbildung. (Frick.)

Gehen wir wieder von dem einfachsten Falle aus, einem Netz, das nur aus einem Knotenpunkt besteht, der von drei Speisepunkten aus mit Strom versehen wird (Fig. 95), so können wir die drei Speisepunkte, da sie der

1) Diese Bezeichnung für das zu beschreibende Verfahren wurde von HERZOG-FELDMANN in der ETZ 1900, S. 167, zugleich mit der Benennung „Netztransfiguration“ eingeführt. Mit Recht beklagen diese Autoren, dass der fremdsprachige Ausdruck, den sie allerdings gleichwertig mit der deutschen Bezeichnung verwenden, von den deutschen Schriftstellern vorzugsweise benutzt wird, während die letztere wenig Anklang gefunden hat.

2) Z. f. E. 1894, S. 265. Siehe auch Fussnote 1, S. 102.

3) A. E. KENELLY: On the determination of current strength in threepointed star resistance systems. El. World, Bd. XXXIV, 1899, S. 268, und: The equivalence of triangles and threepointed stars in conducting networks. Ebenda S. 413. Siehe auch ferner: MONATH: Die Methode der Umformungen . . . Z. f. E. 1902, S. 537. GALLUSSER: Eine einfache Methode . . . ETZ 1903, S. 310.

Voraussetzung gemäss gleiches Potential besitzen, zusammenlegen und erhalten so zwei Zweiecke $I\,1\,II$ und $II\,1\,III$ (Fig. 96). Da jedes Zweieck aus zwei parallel geschalteten Strecken besteht, die frei von Abzweigungen sind, so können wir sie zu einer äquivalenten Strecke zusammenfassen und er-

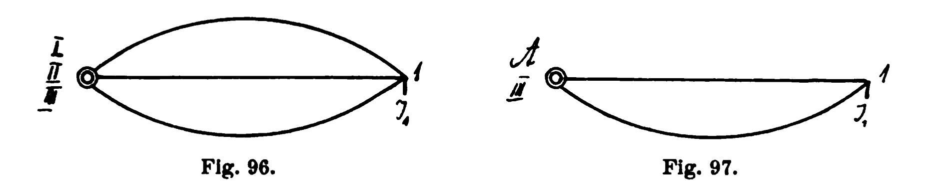


Fig. 96. Fig. 97.

halten so zunächst aus $I1$ und $II1$ die Strecke $A1$ (Fig. 97), deren äquivalente Leitfähigkeit

$$g_{A1} = g_{I1} + g_{II1},$$

und schliesslich aus $A1$ und $III1$ die äquivalente Strecke $B1$, deren Leitfähigkeit

$$g_1 = g_{I1} + g_{II1} + g_{III1},$$

und deren Widerstand also

$$w_1 = \frac{1}{g_1}$$

ist. Dadurch ist diese Leiterverbindung auf den einfachen Fall einer am Ende belasteten Strecke zurückgeführt [3], und der Spannungsverlust in 1 ergiebt sich gemäss Gleichung (2) zu

$$\varepsilon_1 = J_1 w_1.$$

Da ferner nach dem zweiten KIRCHHOFFschen Satze bei parallel geschalteten Leitern die Ströme in diesen sich verhalten wie deren Leitfähigkeiten, so wird

$$J_{I1} : J_{II1} : J_{III1} : J_1 = g_{I1} : g_{II1} : g_{III1} : g_1$$

oder

$$\left.\begin{aligned} J_{I1} &= \frac{g_{I1}}{g_1} \cdot J_1 \\ J_{II1} &= \frac{g_{II1}}{g_1} \cdot J_1 \\ J_{III1} &= \frac{g_{III1}}{g_1} \cdot J_1 \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (147)$$

womit die Stromverteilung bestimmt ist.

90. Zweieck-Umbildung bei mehreren Knotenpunkten.

Liegen Netze mit mehreren Knotenpunkten vor, so gestaltet sich das FRICKsche Verfahren folgendermassen (Fig. 98):

Nachdem alle Belastungen auf die Knotenpunkte übertragen und etwaige parallele Leitungen durch einen äquivalenten Strang ersetzt sind, verbinden wir die Speisepunkte durch widerstandslose Leitungen, die jedoch andere Leiter nicht schneiden dürfen. Es entstehen dadurch in dem vorliegenden

Falle zunächst zwei Zweiecke, *I* 1 *II* und *I* 5 *II*, deren Seiten wir durch äquivalente Strecken ersetzen, und zwar wird (Fig. 99):

$$g_{A1} = g_{I1} + g_{II1}; \quad w_{A1} = \frac{1}{g_{A1}}$$

$$g_{A5} = g_{I5} + g_{II5}; \quad w_{A5} = \frac{1}{g_{A5}}.$$

Dadurch verlieren aber die Punkte 1 und 5 den Charakter von Knotenpunkten und wir können daher ihre Belastungen äquipotentiell auf *A* und 2

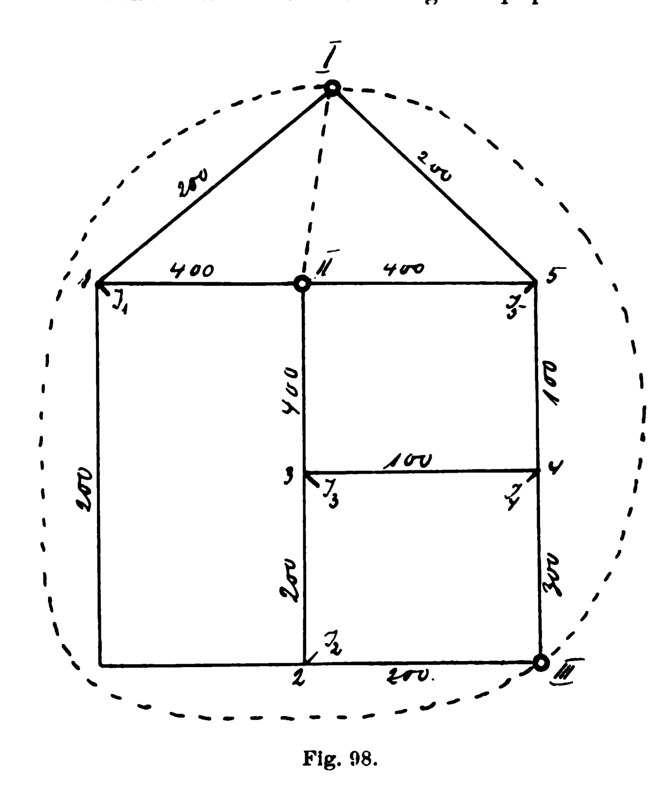


Fig. 98.

bezw. 4 übertragen. Die neuen Belastungen dieser Punkte berechnen sich nach Gleichung (XXV) [69] zu

$$J_A = \frac{w_{12}}{w_{A2}} J_1 + \frac{w_{45}}{w_{A4}} J_5 = (J_1)_A + (J_5)_A$$

$$J_2' = J_2 + \frac{w_{A1}}{w_{A2}} J_1 = J_2 + (J_1)_2$$

$$J_4' = J_4 + \frac{w_{A5}}{w_{A4}} J_5 = J_4 + (J_5)_4.$$

Als Kontrolle ist zu beachten, dass die Summe der neu berechneten Ströme $J_A + J_2' + J_4'$ gleich der Summe der bisher durch Verlegung veränderten Ströme, also gleich $J_1 + J_2 + J_4 + J_5$ sein muss.

Nunmehr bilden die Verbindungen *A* 2 *III* und *A* 4 *III* Zweiecke, deren Seiten durch äquivalente Strecken zu ersetzen sind. Es wird (Fig. 100)

$$g_{B2} = g_{A2} + g_{III2}; \quad w_{B2} = \frac{1}{g_{B2}}$$

$$g_{B4} = g_{A4} + g_{III4}; \quad w_{B4} = \frac{1}{g_{B4}}.$$

Jetzt haben die Punkte 2 und 4 ihren Knotenpunkt-Charakter verloren und wir erhalten daher durch äquipotentielle Übertragung ihrer Lasten:

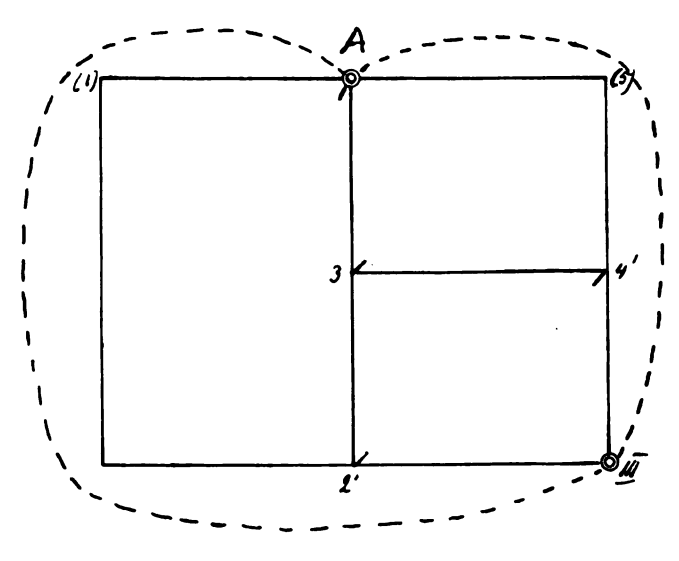


Fig. 99.

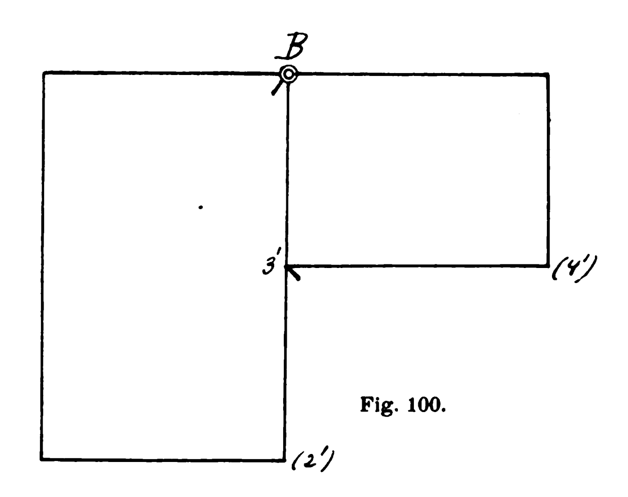


Fig. 100.

$$J_B = J_A + \frac{w_{33}}{w_{B23}} J_2' + \frac{w_{34}}{w_{B43}} J_4' = J_A + (J_2')_B + (J_4')_B$$

$$J_3' = J_3 + \frac{w_{K2}}{w_{B23}} J_2' + \frac{w_{B4}}{w_{B43}} J_4' = J_3 + (J_2')_3 + (J_4')_3$$

und zwar muss $J_B + J_3' = \sum_1^5 J_\nu$ sein.

Schematisch lässt sich diese widerstandstreue Umwandlung in folgender Weise übersichtlich zusammenstellen:

$$\begin{array}{l}
\underbrace{I1 \,\|\, II1}_{A1} + 12 = \underbrace{A2 \,\|\, III2}_{B2} + 23 = B23 \\
\underbrace{I5 \,\|\, II5}_{A5} + 54 = \underbrace{A4 \,\|\, III4}_{B4} + 43 = B43
\end{array} \Bigg\} \; B23 \,\|\, B3 \,\|\, B43.$$

Ebenso giebt die Verlegung und Zusammenfassung der Ströme das folgende Schema:

$$\begin{array}{lllll}
 & & & (J_2')_3 & \\
J_1 \left\langle \begin{array}{l} (J_1)_2 + J_2 = J_2' \\ (J_1)_A \end{array} \right. & & \left\langle \begin{array}{l} (J_2')_3 \\ (J_2')_B \end{array} \right. & & \\
 & \left.\begin{array}{l}(J_1)_A \\ (J_5)_A\end{array}\right\} J_A & \text{———} & \left.\begin{array}{l}(J_2')_B \\ (J_4')_B\end{array}\right\} J_B & \left.\begin{array}{l} J_B \\ J_3 \end{array}\right\} J_3'. \\
J_5 \left\langle \begin{array}{l} (J_5)_A \\ (J_5)_4 + J_4 = J_4' \end{array} \right. & & \left\langle \begin{array}{l} (J_4')_B \\ (J_4')_3 \end{array} \right. & & \\
 & & & (J_4')_3 &
\end{array}$$

Hiermit ist das Netz auf den bereits behandelten Fall dreier paralleler Leitungen [89] zurückgeführt, und wir können nun, rückwärts gehend, die Leiterströme ermitteln. Setzen wir zur Abkürzung

$$g_3 = g_{B23} + g_{II3} + g_{B43}, \quad (g_{B3} \text{ ist } = g_{II3}),$$

so wird nach Gleichung (147):

$$J_{B23} = \frac{g_{B23}}{g_3} J_3'$$

$$J_{B3} = J_{II3} = \frac{g_{II3}}{g_3} J_3'$$

$$J_{B43} = \frac{g_{B43}}{g_3} J_3'.$$

J_{B3} ist bereits der wahre in $II3$ fliessende Strom, also J_{II3}, da ja von dem Strom J_B kein Anteil auf diese Strecke entfällt. Nun bringen wir wieder die Stromabnahmen J_2' und J_4' an und entlasten zugleich die Punkte B und 3 von den vorher auf sie übertragenen Anteilen dieser Ströme. Andererseits müssen wir zu dem Strom J_{B23} noch den zu J_2' gehörenden Anteil von J_B, nämlich $(J_2')_B$, und ebenso zu J_{B43} den Anteil $(J_4')_B$ addieren, da diese Teilströme ja von B aus geliefert werden, und erhalten so die Leiterströme

$$J_{B2} = J_{B23} + (J_2')_B \quad \text{und} \quad J_{B4} = J_{B43} + (J_4')_B$$

und aus diesen die wahren in 23 und 34 fliessenden Ströme

$$J_{23} = J_{B2} - J_2' \qquad \text{und} \qquad J_{43} = J_{B4} - J_4'.$$

Die Ströme J_{B2} und J_{B4} zerfallen, wie Fig. 99 zeigt, in die Komponenten J_{A2} und J_{III2} bezw. J_{A4} und J_{III4}, und zwar ist

$$J_{A2} = \frac{g_{A2}}{g_{B2}} J_{B2}; \quad J_{III2} = \frac{g_{III2}}{g_{B2}} J_{B2}$$

$$J_{A4} = \frac{g_{A4}}{g_{B4}} J_{B4}; \quad J_{III4} = \frac{g_{III4}}{g_{B4}} J_{B4}.$$

Nunmehr werden wieder unter Entlastung von A, $2'$ und $4'$ die Stromabnahmen 1 und 5 angebracht und daher zu J_{A2} und J_{A4} die Teilströme $(J_1)_A$ und $(J_5)_A$ addiert. So erhalten wir

$$J_{A1} = J_{A2} + (J_1)_A \quad \text{und} \quad J_{A5} = J_{A4} + (J_5)_A$$

und hieraus

$$J_{12} = J_{A1} - J_1 \quad \text{und} \quad J_{54} = J_{A5} - J_5.$$

In gleicher Weise werden schliesslich die Komponenten von J_{A1} und J_{A5} unter Berücksichtigung der Fig. 99 ermittelt zu

$$J_{I1} = \frac{g_{I1}}{g_{A1}} J_{A1}; \quad J_{II1} = \frac{g_{II1}}{g_{A1}} J_{A1}$$

$$J_{I5} = \frac{g_{I5}}{g_{A5}} J_{A5}; \quad J_{II5} = \frac{g_{II5}}{g_{A5}} J_{A5}.$$

Damit ist die Stromverteilung im Netz berechnet.

Beispiel.

Um die Rechnung an einem Zahlenbeispiel zu zeigen, geben wir den Leitfähigkeiten der Leiter die in Fig. 98 beigefügten runden Werte. Die Belastung eines jeden Knotenpunktes sei 100 Amp. Wir erhalten dann der Reihe nach:

$$g_{A1} = 600; \quad w_{A1} = 1{\cdot}67 \cdot 10^{-8}$$
$$g_{A5} = 600; \quad w_{A5} = 1{\cdot}67 \cdot 10^{-8}$$

$$(J_1)_A = \frac{5}{6{\cdot}67} \cdot 100 = 75{\cdot}0 \qquad (J_1)_2 = \frac{1{\cdot}67}{6{\cdot}67} \cdot 100 = 25{\cdot}0$$

$$(J_5)_A = \frac{10}{11{\cdot}67} \cdot 100 = 85{\cdot}7 \qquad J_2 = 100{\cdot}0$$

$$J_A = 160{\cdot}7 \qquad J_2' = 125{\cdot}0$$

$$(J_5)_4 = \frac{1{\cdot}67}{11{\cdot}67} \cdot 100 = 14{\cdot}3$$

$$J_4 = 100{\cdot}0$$

$$J_4' = 114{\cdot}3$$

(Kontrolle: $J_A + J_2' + J_4' = J_1 + J_2 + J_4 + J_5 = 400.$)

$$g_{A2} = \frac{1000}{1{\cdot}67 + 5} = 150{\cdot}0; \qquad g_{A4} = \frac{1000}{1{\cdot}67 + 10} = 85{\cdot}6.$$

$$g_{B2} = 200 + 150 = 350 \qquad w_{B2} = 2{\cdot}86 \cdot 10^{-8}$$

$$g_{B4} = 300 + 85{\cdot}6 = 385{\cdot}6; \qquad w_{B4} = 2{\cdot}59 \cdot 10^{-8}$$

$$J_A = 160{\cdot}7 \qquad J_3 = 100{\cdot}0$$

$$(J_2')_B = \frac{5}{7{\cdot}86} \cdot 125 = 79{\cdot}5 \qquad (J_2')_3 = \frac{2{\cdot}86}{7{\cdot}86} \cdot 125 = 45{\cdot}5$$

$$(J_4')_B = \frac{10}{12{\cdot}59} \cdot 114{\cdot}3 = \underline{91{\cdot}0} \qquad (J_4')_3 = \frac{2{\cdot}59}{12{\cdot}59} \cdot 114{\cdot}3 = \underline{23{\cdot}3}$$

$$J_B = 331{\cdot}2 \qquad J_3' = 168{\cdot}8.$$

$(J_B + J_3' = 500 = \Sigma J.)$

$$g_{B23} = \frac{1000}{2{\cdot}86 + 5} = 127{\cdot}5$$

$$g_{B3} = 400{\cdot}0$$

$$g_{B43} = \frac{1000}{2{\cdot}59 + 10} = \underline{79{\cdot}5}$$

$$g_3 = 607{\cdot}0.$$

Daher wird rückwärts:

$$\left.\begin{aligned} J_{B23} &= \frac{127{\cdot}5}{607} \cdot 168{\cdot}8 = 35.5 \\ \boldsymbol{J_{II3}} &= \frac{400}{607} \cdot 168{\cdot}8 = \mathbf{111{\cdot}2} \\ J_{B43} &= \frac{79{\cdot}5}{607} \cdot 168{\cdot}8 = 22{\cdot}1 \end{aligned}\right\} (= 168{\cdot}8 = J_3')$$

$$J_{B2} = 35{\cdot}5 + 79{\cdot}5 = 115{\cdot}0$$

$$J_{B4} = 22{\cdot}1 + 91{\cdot}0 = 113{\cdot}1$$

$$\boldsymbol{J_{23}} = 115{\cdot}0 - 125{\cdot}0 = \mathbf{-10{\cdot}0}$$

$$\boldsymbol{J_{43}} = 113{\cdot}1 - 114{\cdot}3 = \mathbf{-\ 1{\cdot}2}$$

$$\left.\begin{aligned} J_{A2} &= \frac{150}{350} \cdot 115{\cdot}0 = 49{\cdot}2 \\ \boldsymbol{J_{III2}} &= \frac{200}{350} \cdot 115{\cdot}0 = \mathbf{65{\cdot}8} \end{aligned}\right\} (= 115{\cdot}0 = J_{B2})$$

$$\left.\begin{aligned} J_{A4} &= \frac{85{\cdot}6}{385{\cdot}6} \cdot 113{\cdot}1 = 25{\cdot}0 \\ \boldsymbol{J_{III4}} &= \frac{300}{385{\cdot}6} \cdot 113{\cdot}1 = \mathbf{88{\cdot}1} \end{aligned}\right\} (= 113{\cdot}1 = J_{B4})$$

$$J_{A1} = 49{\cdot}2 + 75{\cdot}0 = 124{\cdot}2$$

$$J_{A5} = 25{\cdot}0 + 85{\cdot}7 = 110{\cdot}7$$

$$\boldsymbol{J_{12}} = 124{\cdot}2 - 100 = \mathbf{24{\cdot}2}$$

$$\boldsymbol{J_{54}} = 110{\cdot}7 - 100 = \mathbf{10{\cdot}7}$$

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{J_{I1}} &= \frac{200}{600} \cdot 124{\cdot}2 = \mathbf{41{\cdot}4} \\ \boldsymbol{J_{II1}} &= \frac{400}{600} \cdot 124{\cdot}2 = \mathbf{82{\cdot}8} \end{aligned}\right\} (= 124{\cdot}2 = J_{A1})$$

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{J_{I5}} &= \frac{200}{600} \cdot 110{\cdot}7 = \mathbf{36{\cdot}9} \\ \boldsymbol{J_{II5}} &= \frac{400}{600} \cdot 110{\cdot}7 = \mathbf{73{\cdot}8} \end{aligned}\right\} (= 110{\cdot}7 = J_{A5}).$$

Die Stromverteilung ist in Fig. 101 dargestellt. Die Kontrolle der Ströme und Spannungsverluste in den Knotenpunkten ergiebt deren Richtigkeit.

91. Widerstandstreue Umbildung des Dreiecks in einem Stern und umgekehrt. (Kenelly.)

Das Wesen der FRICK schen Methode der widerstandstreuen Auflösung eines Leitungsnetzes in einen einfachen Leitungsstrang, wie sie bisher entwickelt wurde, besteht darin, dass, von einem oder mehreren kombinierten Zweiecken ausgehend, von n in einem Knotenpunkt zusammenlaufenden Lei-

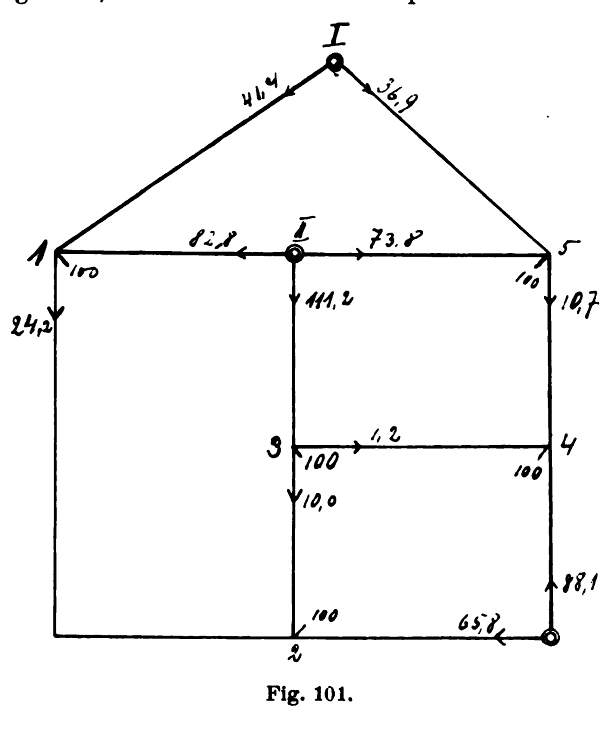


Fig. 101.

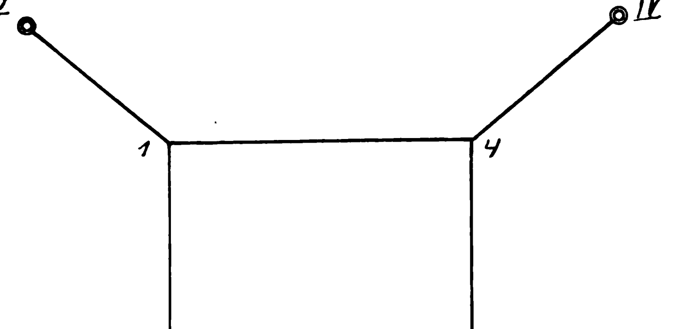


Fig. 102.

tern $n-1$ parallel geschaltete Stränge zu einem äquivalenten Strange zusammengefasst wurden, so dass, ohne Änderung des Potentials des Punktes, dieser den Charakter eines Knotenpunktes verlor, und daher seine Last äquipotentiell auf die nächsten Speise- und Knotenpunkte übertragen werden konnte. Das Verfahren versagt natürlich, wenn es nicht möglich ist, Zwei-

ecke zu bilden, d. h. wenn nach entsprechender Reduktion des Netzes noch Leiterverbindungen übrig bleiben, bei denen zwischen je zwei Speisepunkten mehr als ein Knotenpunkt liegt, also stets, wenn innerhalb des Netzes geschlossene Polygone vorhanden sind, deren Ecken sämtlich Knotenpunkte sind (Fig. 102). In diesem Falle kann man jedoch von einem Satz Gebrauch machen, den zuerst KENELLY[1]) angegeben hat und dessen allgemeiner Beweis von HERZOG-FELDMANN[2]) geliefert worden ist. Dieser Satz lautet:

Es ist stets möglich, ein Leitungsdreieck unabhängig von den an seinen Eckpunkten herrschenden Potentialen in einen widerstandstreuen Stern und umgekehrt einen Stern in ein widerstandstreues Dreieck so zu verwandeln, dass die Eckpotentiale ungeändert bleiben dadurch, dass man den Stern- bezw. Dreieckswiderständen bestimmte von den ursprünglichen Dreiecks- bezw. Sternwiderständen abhängige Werte erteilt.

Ist (Fig. 103) 1 2 3 das gegebene in einen Stern 10, 20, 30 zu verwandelnde Dreieck, dessen Eckpotentiale $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ seien, so wählen wir den

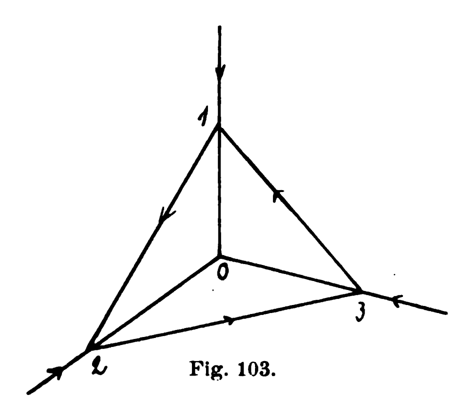


Fig. 103.

Sternpunkt 0 so, dass sein Potential $\mathcal{E}_0$ den Schwerpunkt des Dreiecks bildet. Dann erhalten wir, da J_{10} die Stromsumme $J_{12} + J_{13}$ ersetzt:

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_0 = w_{10} J_{10} = w_{10} (J_{12} + J_{13}) = w_{10} \left(\frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{w_{12}} + \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3}{w_{13}} \right) \quad (148)$$

und zwei ähnliche Beziehungen für die beiden andern Sternschenkel. Denken wir uns nun die Widerstände der Dreiecksseiten an den gegenüberliegenden Eckpunkten als Gewichte wirkend, so ergiebt der aus der Mechanik bekannte Satz über Momente die weitere Beziehung:

$$\mathcal{E}_1 w_{23} + \mathcal{E}_2 w_{31} + \mathcal{E}_3 w_{12} = \mathcal{E}_0 (w_{12} + w_{23} + w_{31}) \quad . \quad . \quad (149)$$

Wird nun der hieraus folgende Wert für $\mathcal{E}_0$ in die drei Gleichungen (148) eingesetzt, so fallen die Potentialdifferenzen $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ und $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$ u. s. w. heraus und wir erhalten unabhängig von ihnen als Werte der Sternwiderstände:

1) S. Fussnote 3, S. 136.
2) S. Fussnote 1, S. 136.

$$\left.\begin{aligned} w_{10} &= \frac{w_{12}\, w_{13}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \\ w_{20} &= \frac{w_{23}\, w_{21}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \\ w_{30} &= \frac{w_{31}\, w_{32}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (150)$$

In Worten: Der Schenkelwiderstand des Sterns ist gleich dem Produkt der anliegenden Seitenwiderstände des Dreiecks dividiert durch die Summe der Dreieckswiderstände.

Eine ganz ähnliche Überlegung ergiebt, wenn wir die Leitfähigkeit jedes Sternschenkels als Gewicht an dem äusseren Punkte des zugehörigen Schenkels wirken lassen, die Beziehungen für die Umwandlung des Sterns in ein Dreieck:

$$\left.\begin{aligned} g_{12} &= \frac{g_{10}\, g_{20}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}} \\ g_{23} &= \frac{g_{20}\, g_{30}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}} \\ g_{31} &= \frac{g_{30}\, g_{10}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (151)$$

Die Leitfähigkeit eines Dreieckswiderstandes ist gleich dem Produkt der Leitfähigkeiten der anliegenden Sternschenkel dividiert durch die Summe der Sternleitfähigkeiten.

Beide Formelreihen (150) und (151) lassen sich zu den folgenden für das Gedächtnis bequemen gemeinsamen Gleichungen vereinigen:[1])

$$\left.\begin{aligned} w_{10}\, w_{23} = w_{20}\, w_{31} = w_{30}\, w_{12} &= \frac{w_{12}\, w_{23}\, w_{31}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \\ g_{12}\, g_{30} = g_{23}\, g_{10} = g_{31}\, g_{20} &= \frac{g_{10}\, g_{20}\, g_{30}}{g_{10} + g_{20} + g_{30}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (152)$$

Gehen wir dann rückwärts wieder vom Stern auf das Dreieck bezw. vom Dreieck auf den Stern zurück, so werden, wie sich leicht zeigen lässt, die früheren Widerstände bezw. Leitfähigkeiten wiedererhalten. Denn es ergiebt sich z. B. für den ersten Fall (Dreiecksumbildung zum Stern) bei der Rückumbildung nach Gleichung (151):

$$w_{12} = \frac{1}{g_{12}} = \frac{g_{10} + g_{20} + g_{30}}{g_{10}\, g_{20}} = \frac{\dfrac{1}{w_{10}} + \dfrac{1}{w_{20}} + \dfrac{1}{w_{30}}}{\dfrac{1}{w_{10}\, w_{20}}}$$

und daher nach Gleichung (150):

$$w'_{12} = \frac{\dfrac{1}{w_{12}\, w_{13}} + \dfrac{1}{w_{23}\, w_{21}} + \dfrac{1}{w_{31}\, w_{32}}}{w_{12} + w_{23} + w_{31}} \cdot w^2_{12}\, w_{23}\, w_{31} = w_{12}.$$

Hieraus folgt aber, dass wir dieses Verhalten der Widerstände und Leitfähigkeiten der äquivalenten Dreiecks- und Sterngebilde mit Vorteil zur

1) J. K. Sumec, Z. f. E. 1903, S. 624a.

Kontrolle der Rechnung benutzen können, indem wir rückwärts aus den neuberechneten Widerständen die gegebenen Leitfähigkeiten und umgekehrt berechnen (vgl. das folgende Beispiel).

Wie Herzog-Feldmann weiterhin gezeigt haben, ist es nicht möglich, allgemein ein Mehreck unabhängig von den Potentialen der Eckpunkte durch das gleiche Verfahren in einen mehrschenkligen Stern zu verwandeln, da die Eckpotentiale sich aus den Ausdrücken für die Schenkelwiderstände nicht herausheben.

92. Übertragung der Ströme.

Durch die Umbildung eines Dreiecks in einen widerstandstreuen Stern verlieren die Knotenpunkte ihren Charakter als solche, und man kann daher ihre Lasten auf die nächstliegenden Kreuzungspunkte und den Sternpunkt

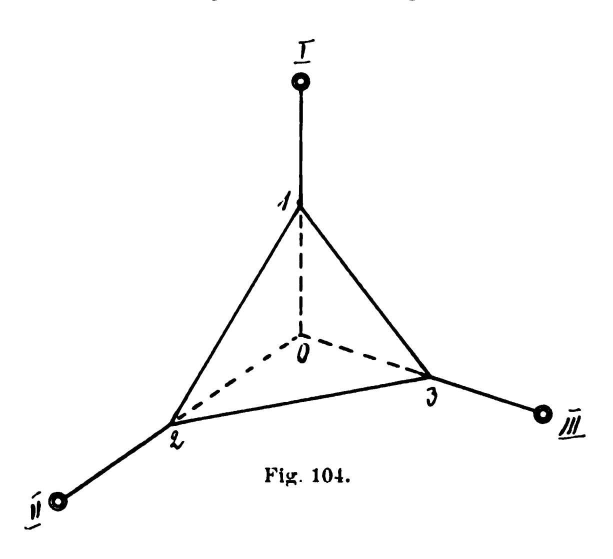


Fig. 104.

äquipotentiell übertragen. Sind die ersteren Speisepunkte (Fig. 104), so wird nach dem Früheren (Gleichung XXV) [69]

$$(J_1)_0 = \frac{w_{I1}}{w_{I0}} J_1 \text{ u. s. w.}$$

und daraus ergeben sich die Leiterströme nach Gleichung (147) [89] zu:

$$J_{I0} = \frac{g_{I0}}{g_{I0} + g_{II0} + g_{III0}} \left\{ (J_1)_0 + (J_2)_0 + (J_3)_0 \right\}$$

und ähnlich J_{II0} und J_{III0}.

Gehen wir andererseits rückwärts vom Stern wieder auf das Dreieck, so sind zunächst die vorher entlasteten Knotenpunkte wieder durch Rückverlegung der Teilströme $(J_1)_I$, $(J_1)_0$ u. s. w. zu belasten, und es folgt daher, da in der Teilstrecke $I1$ nunmehr ausser dem Strom J_{I0} auch der Teilstrom $(J_1)_I$ fliesst:

$$J_{I1} = J_{I0} + (J_1)_I; \quad J_{II2} = J_{II0} + (J_2)_{II}; \quad J_{III3} = J_{III0} + (J_3)_{III},$$

wie bereits in [90] dargelegt. Daher wird der Leiterstrom in den Sternschenkeln:

$$J_{10} = J_{I1} - J_1; \quad J_{20} = J_{II2} - J_2; \quad J_{30} = J_{III3} - J_3.$$

Für die Berechnung von J_{12}, J_{23} und J_{31} aus J_{10}, J_{20} und J_{30} wissen wir, dass die Potentiale der Endpunkte vor und nach der Umwandlung die gleichen sind, dass also

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{20}$$

ist. Daher wird

$$J_{12} = \frac{1}{w_{12}} (J_{10} w_{10} - J_{20} w_{20}) = g_{12} \left(\frac{J_{10}}{g_{10}} - \frac{J_{20}}{g_{20}}\right) \quad . \quad (153)$$

und ähnlich J_{23} und J_{31}.

Bei der Verwandlung des Sterns in ein Dreieck dagegen ergiebt sich die Übertragung der Belastung des Sternpunktes J_0 auf die Eckpunkte des widerstandstreuen Dreiecks nach Herzog-Feldmann[1]) in folgender Weise: Die in den Sternschenkeln fliessenden Ströme sind:

$$\left.\begin{aligned} J_{10} &= (\mathfrak{E}_1 - \mathfrak{E}_0)\, g_{10} \\ J_{20} &= (\mathfrak{E}_2 - \mathfrak{E}_0)\, g_{20} \\ J_{30} &= (\mathfrak{E}_3 - \mathfrak{E}_0)\, g_{30} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (154)$$

und ihre Summe giebt

$$(\mathfrak{E}_1 - \mathfrak{E}_0)\, g_{10} + (\mathfrak{E}_2 - \mathfrak{E}_0)\, g_{20} + (\mathfrak{E}_3 - \mathfrak{E}_0)\, g_{30} = J_0,$$

woraus

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{\mathfrak{E}_1 g_{10} + \mathfrak{E}_2 g_{20} + \mathfrak{E}_3 g_{30} - J_0}{g_{00}} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (155)$$

wenn, wie früher,

$$g_{00} = g_{10} + g_{20} + g_{30}.$$

Wird dieser Wert in die Gleichungen (154) eingesetzt, so folgt

$$\begin{aligned} J_{10} &= \mathfrak{E}_1 g_{10} - \frac{g_{10}}{g_{00}} (\mathfrak{E}_1 g_{10} + \mathfrak{E}_2 g_{20} + \mathfrak{E}_3 g_{30}) + J_0 \frac{g_{10}}{g_{00}} \\ &= i_1 + J_1, \end{aligned}$$

wenn die beiden ersten Glieder zu dem Teilstrom i_1 zusammengefasst werden. Ähnliche Ausdrücke werden für J_{20} und J_{30} erhalten. Die Leiterströme J_{10}, J_{20} und J_{30} bestehen also aus einer Komponente, die nur von den Potentialen in 1, 2 und 3, nicht aber von der Belastung J_0, und aus einer solchen, die nur von J_0, nicht aber von den Eckpotentialen des Dreiecks abhängen. Diese letzten Teilströme J_1, J_2 und J_3 können also, ohne die Potentiale zu ändern, von den bezüglichen Eckpunkten 1, 2 und 3 abgezweigt werden und bilden daher die Komponenten der Sternbelastung für die Ecken des Dreiecks, während die anderen Komponenten i_1, i_2 und i_3 als von den Eckpotentialen abhängige Kompensationsströme aufzufassen sind, die sich aber gegenseitig aufheben, wie durch Addition der betreffenden Ausdrücke leicht zu ersehen ist. Es wird also:

$$J_1 = \frac{g_{10}}{g_{00}} J_0; \quad J_2 = \frac{g_{20}}{g_{00}} J_0; \quad J_3 = \frac{g_{30}}{g_{00}} J_0 \quad . \; . \; . \; . \quad (156)$$

d. h. aber, die Verlegung des Stromes J_0 auf die Ecken des Dreiecks erfolgt so, als wenn diese gleiche Potentiale hätten (Gleichung 147) [89].

1) Elektrische Leitungsnetze.

Bei der Rückkehr vom Dreieck zum Stern ergeben sich die den Leiterströmen des Dreiecks entsprechenden Schenkelströme des Sterns durch einfache Addition der ersteren:

$$J_{01} = J_{21} + J_{31}; \quad J_{02} = J_{32} + J_{12}; \quad J_{03} = J_{13} + J_{23} \,. \quad (157)$$

Beispiel. Die FRICK-KENELLY sche Methode ermöglicht es nun, auch sehr komplizierte Netze schrittweise in einen einfachen Leitungsstrang umzuwandeln.

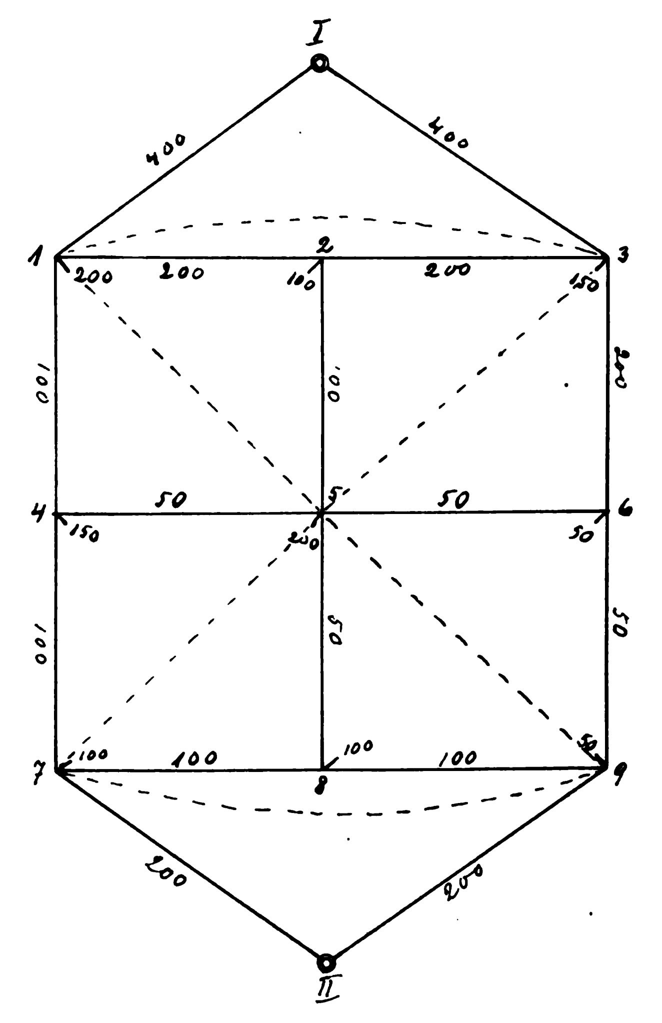


Fig. 105.

Als Beispiel möge die Stromverteilung in dem in Fig. 105 dargestellten Netze bestimmt werden. Die Zahlen an den Knotenpunkten sind deren Belastungen in Amp., die den Leitern beigefügten Zahlen bedeuten Leitfähigkeiten, denen in Klammern die Widerstandswerte in Milliohm hinzugefügt sind. Bei der Rechnung mit Widerständen benutzen wir der Bequemlichkeit wegen die Milliohm-Zahlen, d. h. wir lassen den Faktor 10^{-3} fort und berücksichtigen ihn nur bei der Umrechnung der Widerstände in Leitfähigkeiten.

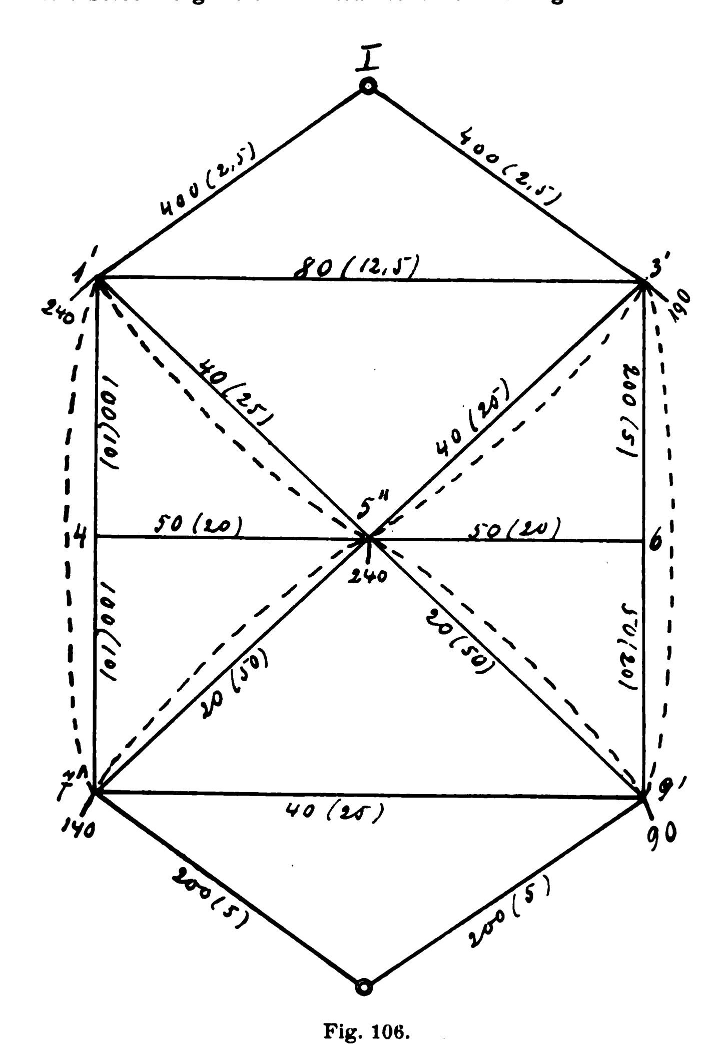


Fig. 106.

Umbildung des Sterns 2 in Dreieck 135 (Fig. 105 u. 106).

$$(J_2)_1 = \frac{200}{500} \cdot 100 = 40 \qquad g_{13} = \frac{200 \cdot 200}{500} = 80; \quad w_{13} = 12{\cdot}5$$

$$J_1 = 200$$

$$J'_1 = 240 \qquad g_{35} = \frac{200 \cdot 100}{500} = 40; \quad w_{35} = 25{\cdot}0$$

$$(J_2)_3 = \frac{200}{500} \cdot 100 = 40 \qquad g_{51} = \frac{100 \cdot 200}{500} = 40; \quad w_{51} = 25{\cdot}0$$

$$J_3 = 150$$

$$J'_3 = 190 \qquad (\text{Kontrolle: } w_{12} = \frac{12{\cdot}5 \cdot 25}{62{\cdot}5} = 5{\cdot}0$$

$$(J_2)_5 = \frac{100}{500} \cdot 100 = 20 \qquad w_{52} = \frac{25 \cdot 25}{62{\cdot}5} = 10{\cdot}0$$

$$J_5 = 200$$

$$J'_5 = 220 \qquad w_{32} = \frac{25 \cdot 12{\cdot}5}{62{\cdot}5} = 5{\cdot}0).$$

7. Dreieck 1 a 7 (Fig. 109 und 110).

$$w_{1b} = \frac{25 \cdot 4{\cdot}88}{63{\cdot}9} = 1{\cdot}91; \quad g_{1b} = 524 \quad \left(g_{1a} = \frac{524 \cdot 385}{984} = 204{\cdot}6\right.$$

$$w_{ab} = \frac{4{\cdot}88 \cdot 34}{63{\cdot}9} = 2{\cdot}60; \quad g_{ab} = 385 \quad g_{a7} = \frac{385 \cdot 75{\cdot}2}{984} = 29{\cdot}4$$

$$w_{7b} = \frac{34 \cdot 25}{63{\cdot}9} = 13{\cdot}3; \quad g_{7b} = 75{\cdot}2 \quad \left.g_{71} = \frac{75{\cdot}2 \cdot 524}{984} = 40{\cdot}0\right)$$

$$w_{I1} = 2{\cdot}50$$

$$w_{1b} = \underline{1{\cdot}91}$$

$$w_{Ib} = 4{\cdot}41; \quad g_{Ib} = 226{\cdot}8.$$

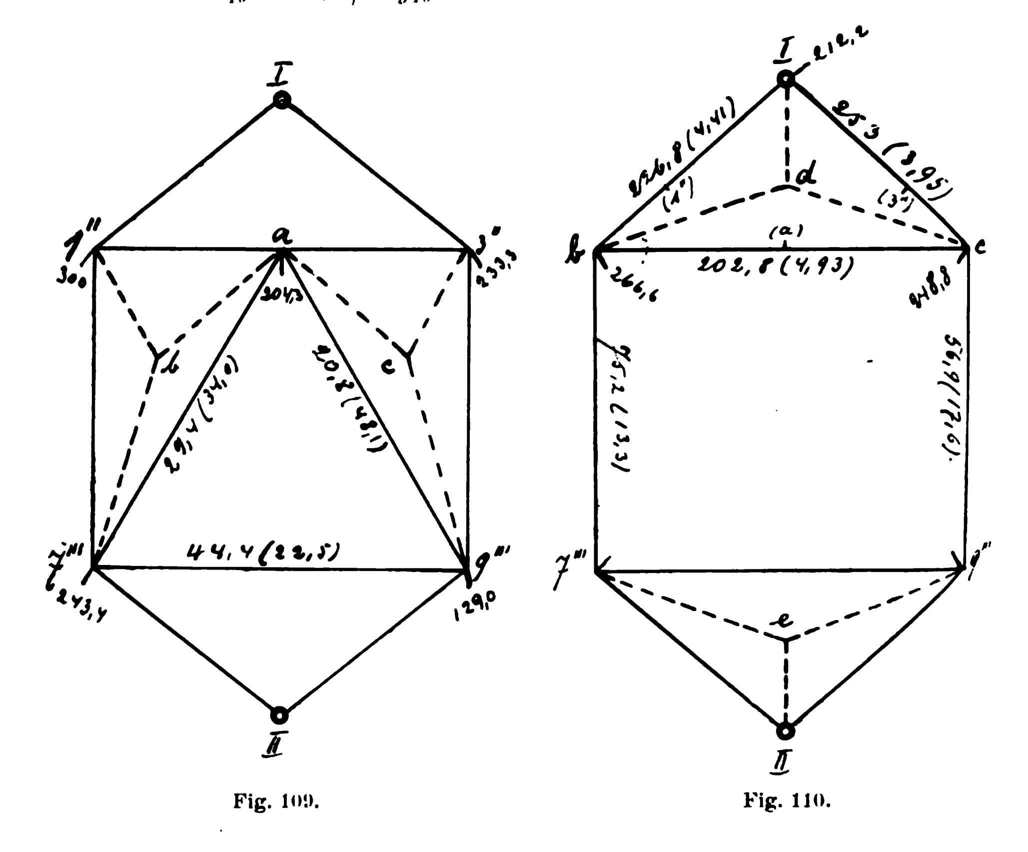


Fig. 109. Fig. 110.

8. Dreieck 3 a 9 (Fig. 109 und 110).

$$w_{ac} = \frac{48{\cdot}1 \cdot 3{\cdot}98}{82{\cdot}1} = 2{\cdot}33; \quad g_{ac} = 429 \quad \left(g_{a3} = \frac{429 \cdot 688}{1174} = 251\right.$$

$$w_{3c} = \frac{3{\cdot}98 \cdot 30}{82{\cdot}1} = 1{\cdot}453; \quad g_{3c} = 688 \quad g_{39} = 33{\cdot}3$$

$$w_{9c} = \frac{30 \cdot 48{\cdot}1}{82{\cdot}1} = 17{\cdot}56; \quad g_{9c} = 56{\cdot}9 \quad \left.g_{9a} = 20{\cdot}8\right)$$

$$w_{I3} = 2{\cdot}50 \qquad w_{ab} = 2{\cdot}60$$

$$w_{3c} = \underline{1{\cdot}45} \qquad w_{ac} = \underline{2{\cdot}33}$$

$$w_{Ic} = 3{\cdot}95; \quad g_{Ic} = 253; \quad w_{bc} = 4{\cdot}93; \quad g_{bc} = 202{\cdot}8$$

$(J''_1)_b = \frac{2\cdot5}{4\cdot41}\cdot300 = 170\cdot0$ $(J''_3)_c = \frac{2\cdot5}{3\cdot953}\cdot223\cdot3 = 141\cdot1$ $(J''_1)_I = \frac{1\cdot91}{4\cdot41}\cdot300 = 130\cdot0$

$(J_a)_b = \frac{2\cdot33}{4\cdot93}\cdot204\cdot3 = \underline{96\cdot6}$ $(J_a)_c = \frac{2\cdot6}{4\cdot93}\cdot204\cdot3 = \underline{107\cdot7}$ $(J''_3)_I = \frac{1\cdot453}{3\cdot953}\cdot223\cdot3 = \underline{82\cdot2}$

$J_b = 266\cdot6$ $J_c = 248\cdot8$ $J_I = 212\cdot2$

$(J_b + J_c + J_I + J'''_7 + J'''_9 = 266\cdot6 + 248\cdot8 + 212\cdot2 + 243\cdot4 + 129\cdot0 = 1100 = \Sigma J).$

9. Dreieck Ibc (Fig. 110 und 111).

$w_{Id} = \frac{3\cdot95\cdot4\cdot41}{13\cdot29} = 1\cdot310;\quad g_{Id} = 764.\quad (g_{Ib} = \frac{764\cdot611}{2057} = 227$

$w_{bd} = \frac{4\cdot41\cdot4\cdot93}{13\cdot29} = 1\cdot637;\quad g_{bd} = 611.\quad g_{bc} = 203$

$w_{cd} = \frac{4\cdot93\cdot3\cdot95}{13\cdot29} = 1\cdot467;\quad g_{cd} = 682.\quad g_{cI} = 254).$

10. Dreieck II 79 (Fig. 110 und 111).

$w_{IIe} = \frac{5\cdot5}{32\cdot5} = 0\cdot770;\quad g_{IIe} = 1298.\quad (g_{II7} = 200 = g_{II9}$

$w_{7e} = \frac{5\cdot22\cdot5}{32\cdot5} = 3\cdot46;\quad g_{7e} = 289.\quad g_{79} = 44\cdot5)$

$w_{9e} = \frac{22\cdot5\cdot5}{32\cdot5} = 3\cdot46;\quad g_{9e} = 289.$

$w_{b7} = 13\cdot3$ $w_{b7} = 13\cdot3$ $w_{cd} = 1\cdot47$ $w_{c9} = 17\cdot56$

$w_{7e} = \underline{3\cdot46}$ $w_{bd} = \underline{1\cdot64}$ $w_{c9} = \underline{17\cdot56}$ $w_{9e} = \underline{3\cdot46}$

$w_{be} = 16\cdot76$ $w_{d7} = 14\cdot94$ $w_{d9} = 19\cdot03$ $w_{ce} = 21\cdot02$

$w_{bd} = \underline{1\cdot64}$ $w_{9e} = \underline{3\cdot46}$

$w_{dbe} = 18\cdot40$ $w_{dce} = 22\cdot49$

$g_{dbe} = 54\cdot4$ $g_{dce} = 44\cdot5$

$(J_b)_d = \frac{16\cdot76}{18\cdot40}\cdot266\cdot6 = 242\cdot9$ $(J_b)_e = \frac{1\cdot64}{18\cdot40}\cdot266\cdot6 = 23\cdot7$

$(J'''_7)_d = \frac{3\cdot46}{18\cdot40}\cdot243\cdot4 = 45\cdot8$ $(J'''_7)_e = \frac{14\cdot94}{18\cdot40}\cdot243\cdot4 = 197\cdot6$

$(J_c)_d = \frac{21\cdot02}{22\cdot49}\cdot248\cdot8 = 232\cdot6$ $(J_c)_e = \frac{1\cdot47}{22\cdot49}\cdot248\cdot8 = 16\cdot2$

$(J'''_9)_d = \frac{3\cdot46}{22\cdot49}\cdot129\cdot0 = \underline{19\cdot8}$ $(J'''_9)_d = \frac{19\cdot03}{22\cdot49}\cdot129\cdot0 = \underline{109\cdot2}$

$J_d = 541\cdot1$ $J_e = 346\cdot7.$

11. Zweieck *de* (Fig. 111 und 112).

$g_{dbe} = 54\cdot4$ $(J_d)_I = \frac{10\cdot88}{12\cdot19}\cdot541\cdot1 = 482\cdot9$

$g_{dce} = \underline{44\cdot5}$ $(J_e)_I = \frac{0\cdot77}{12\cdot19}\cdot346\cdot7 = 21\cdot9$

$g_{de} = 98\cdot9$ $J_I = \underline{212\cdot2}$

$w_{de} = 10\cdot11$ $J'_I = 717\cdot0$

$w_{Id} = \underline{1\cdot31}$ $(J_d)_{II} = \frac{1\cdot31}{12\cdot19}\cdot541\cdot1 = 58\cdot2$

$w_{Ie} = 11\cdot42$ $(J_e)_{II} = \frac{11\cdot42}{12\cdot19}\cdot346\cdot7 = \underline{324\cdot8}$

$w_{IIe} = \underline{0\cdot77}$ $J_{II} = 383\cdot0$

$w_{III} = 12\cdot19$ $(J'_I + J_{II} = 1100 = \Sigma J).$

$w_{IId} = 10\cdot88.$

7. Dreieck 1 a 7 (Fig. 109 und 110).

$$w_{1b} = \frac{25 \cdot 4.88}{63.9} = 1.91; \quad g_{1b} = 524 \quad \left(g_{1a} = \frac{524 \cdot 385}{984} = 204.6\right.$$

$$w_{ab} = \frac{4.88 \cdot 34}{63.9} = 2.60; \quad g_{ab} = 385 \quad g_{a7} = \frac{385 \cdot 75.2}{984} = 29.4$$

$$w_{7b} = \frac{34 \cdot 25}{63.9} = 13.3; \quad g_{7b} = 75.2 \quad \left. g_{71} = \frac{75.2 \cdot 524}{984} = 40.0\right)$$

$$w_{I1} = 2.50$$
$$w_{1b} = \underline{1.91}$$
$$w_{Ib} = 4.41; \quad g_{Ib} = 226.8.$$

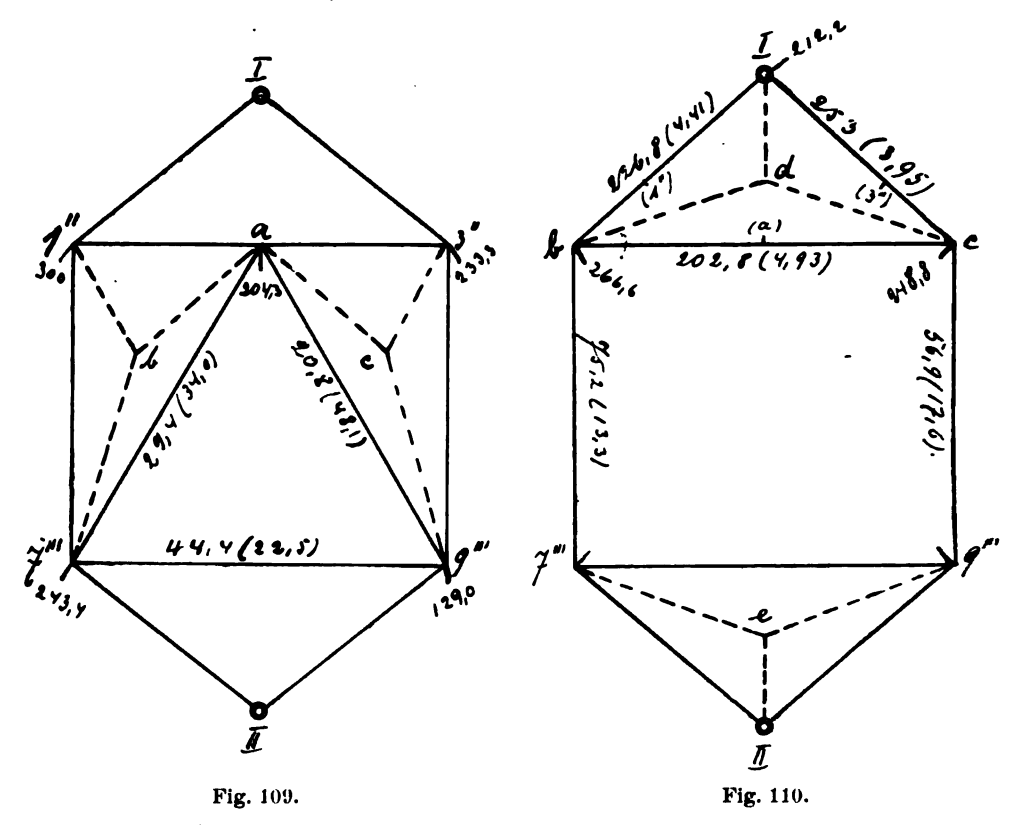


Fig. 109. Fig. 110.

8. Dreieck 3 a 9 (Fig. 109 und 110).

$$w_{ac} = \frac{48.1 \cdot 3.98}{82.1} = 2.33; \quad g_{ac} = 429 \quad \left(g_{a3} = \frac{429 \cdot 688}{1174} = 251\right.$$

$$w_{3c} = \frac{3.98 \cdot 30}{82.1} = 1.453; \quad g_{3c} = 688 \quad g_{39} = 33.3$$

$$w_{9c} = \frac{30 \cdot 48.1}{82.1} = 17.56; \quad g_{9c} = 56.9 \quad \left. g_{9a} = 20.8\right)$$

$$w_{I3} = 2.50 \qquad w_{ab} = 2.60$$
$$w_{3c} = \underline{1.45} \qquad w_{ac} = \underline{2.33}$$
$$w_{Ic} = 3.95; \quad g_{Ic} = 253; \quad w_{bc} = 4.93; \quad g_{bc} = 202.8$$

13. Rückkehr zu Dreieck II 79 (Fig. 111 und 110).

Nach Gleichung (153) wird:

$\boldsymbol{J_{II7}} = 200\ (383{\cdot}0 \cdot 0{\cdot}77 + 241{\cdot}3 \cdot 3{\cdot}46) = \mathbf{226{\cdot}0}$ $(J_{II7} + J_{II9} = 383{\cdot}0 = J_{IIc}$

$\boldsymbol{J_{II9}} = 200\ (383{\cdot}0 \cdot 0{\cdot}77 + 141{\cdot}7 \cdot 3{\cdot}46) = \mathbf{157{\cdot}0}$ $J_{7II} + J''_{79} = -241{\cdot}3 = J_{7c}$

$J''_{97} = 44{\cdot}4\,(241{\cdot}3 \cdot 3{\cdot}46 - 141{\cdot}7 \cdot 3{\cdot}46) = 15{\cdot}3$ $J_{9II} + J''_{97} = -141{\cdot}7 = J_{9c})$.

14. Rückkehr zu Dreieck *Ibc* (Fig. 110 u. 109).

$$J_{Ib} = 226{\cdot}8\,(504{\cdot}8 \cdot 1{\cdot}310 + 268{\cdot}7 \cdot 1{\cdot}637) = 249{\cdot}9$$
$$J_{Ic} = 253{\cdot}0\,(504{\cdot}8 \cdot 1{\cdot}310 + 236{\cdot}1 \cdot 1{\cdot}467) = 254{\cdot}9$$
$$J_{bc} = 202{\cdot}8\,(-268{\cdot}7 \cdot 1{\cdot}637 + 236{\cdot}1 \cdot 1{\cdot}467) = -18{\cdot}8$$

$$(J_{Ib} + J_{Ic} = 504{\cdot}8 = J_{Id}$$
$$J_{bI} + J_{bc} = -268{\cdot}7 = J_{bd}$$
$$J_{cI} + J_{cb} = -236{\cdot}1 = J_{cd}).$$

Rückverlegung von J_1'', J_3'' und J_a:

$J_{Ib} = 249{\cdot}9$	$J_{Ic} = 254{\cdot}9$	$J_{bc} = -18{\cdot}8$
$+ (J_1'') = 130{\cdot}0$	$+ (J_3'')_I = 82{\cdot}2$	$+ (J_a)_b = 96{\cdot}6$
$\boldsymbol{J_{I1} = 379{\cdot}9}$	$\boldsymbol{J_{I3} = 337{\cdot}1}$	$J_{ba} = 77{\cdot}8$

$J_{1b} = J_{I1} - J_1'' = 79{\cdot}9.$ $J_{3c} = J_{I3} - J_3'' = 113{\cdot}8.$ $J_{ac} = J_{ba} - J_a = -126{\cdot}5.$

$(J_{I1} + J_{I3} = 717{\cdot}0 = J_I'$; $J_{1b} + J_{ab} + J_{7b} = 0$; $J_{ac} + J_{3c} + J_{9c} = 0.)$

15. Rückkehr zu Dreieck 17a und 39a (Fig. 109 u. 108).

$$J_{1a} = 204{\cdot}9\,(79{\cdot}9 \cdot 1{\cdot}91 + 77{\cdot}8 \cdot 2{\cdot}60) = 72{\cdot}7$$
$$J_{a7} = 29{\cdot}37\,(-77{\cdot}8 \cdot 2{\cdot}60 + 2{\cdot}1 \cdot 13{\cdot}3) = -5{\cdot}1$$
$$J_{71} = 40{\cdot}0\,(-2{\cdot}1 \cdot 13{\cdot}3 - 79{\cdot}9 \cdot 1{\cdot}91) = -7{\cdot}2$$
$$J_{3a} = 251{\cdot}1\,(113{\cdot}8 \cdot 1{\cdot}453 + 126{\cdot}5 \cdot 2{\cdot}33) = 115{\cdot}7$$
$$J_{a9} = 20{\cdot}79\,(-126{\cdot}5 \cdot 2{\cdot}33 - 12{\cdot}7 \cdot 17{\cdot}56) = -10{\cdot}8$$
$$J_{93} = 33{\cdot}3\,(12{\cdot}7 \cdot 17{\cdot}56 - 113{\cdot}8 \cdot 1{\cdot}453) = 1{\cdot}9$$

$$J_{97}' = \frac{4{\cdot}41}{44{\cdot}41} \cdot 15{\cdot}3 = 1{\cdot}5$$
$$J_{97} = \frac{40{\cdot}0}{44{\cdot}41} \cdot 15{\cdot}3 = 13{\cdot}8.$$

$$(J_{1a} + J_{17} = 79{\cdot}9 = J_{1b}$$
$$J_{71} + J_{7a} = -2{\cdot}1 = J_{7b}$$
$$J_{a7} + J_{a1} = -77{\cdot}8 = J_{ab}$$
$$J_{3a} + J_{39} = 113{\cdot}8 = J_{3c}$$
$$J_{93} + J_{9a} = 12{\cdot}7 = J_{9c}$$
$$J_{a9} + J_{a3} = -126{\cdot}5 = J_{ac}$$
$$J_{1a} + J_{3a} + J_{7a} + J_{9a} = 204{\cdot}3 = J_a).$$

16. Rückkehr zu Stern 5 (Fig. 108).

$J_{5a}' = 5{\cdot}1 + 10{\cdot}8 = 15{\cdot}9$ $(J_{5a}' + J_{59}' + J_{57}' = 0).$

$J_{59}' = -10{\cdot}8 - 1{\cdot}5 = -12{\cdot}3$

$J_{57}' = 1{\cdot}5 - 5{\cdot}1 = -3{\cdot}6$

Rückverlegung von J_5^{IV}.

$J_{a5} = -15·9 + 204·3 = 188·4$ ($J_{a5} + J_{75} + J_{95} = 278·4 = J_5^{IV}$

$J_{75} = 3·6 + 43·4 = 47·0$ $J_{1a} + J_{3a} + J_{5a} = 0$

$J_{95} = 12·3 + 30·7 = 43·0$ $J_{57} + J_{17} + J_{II7} + J_{97} = 200 = J_7''$ u. s. w.).

17. Rückkehr zu Dreieck 153 (Fig. 108 u. 107).

$J_{13} = 80·0\,(72·7 \cdot 4·88 - 115·7 \cdot 3·98) = -8·6$

$J_{35}'' = 73·3\,(115·7 \cdot 3·98 + 188·4 \cdot 5·31) = 107·1$

$J_{51}'' = 60·0\,(-188·4 \cdot 5·31 - 72·7 \cdot 4·88) = -81·3.$

($J_{I1} + J_{71} + J_{51}'' + J_{31} = 300·0 = J_1''$

$J_{I3} + J_{13} + J_{53}'' + J_{93} = 223·3 = J_3''$

$J_{I5}'' + J_{35}'' + J_{75} + J_{95} = 278·4 = J_5^{IV}$.)

$J_{15}' = \frac{20}{60} \cdot 81·3 = 27·1$ $J_{15} = \frac{40}{60} \cdot 81·3 = 54·2$

$J_{35}' = \frac{33·3}{73·3} \cdot 107·1 = 48·6$ $J_{35} = \frac{40}{73·3} \cdot 107·1 = 58·5$

$J_{75}' = \frac{20}{40} \cdot 47·0 = 23·5$ $J_{75} = \frac{20}{40} \cdot 47·0 = 23·5$

$J_{95}' = \frac{8·33}{28·3} \cdot 43·0 = 12·7$ $J_{95} = \frac{20}{28·3} \cdot 43·0 = 30·3.$

18. Rückkehr zu Stern 4 und 6 (Fig. 107 u. 106).

$J_{14}' = 27·1 + 7·2 = 34·3$ ($J_{14}' + J_{74}' + J_{54}' = 0$)

$J_{74}' = -7·2 + 23·5 = 16·3$

$J_{54}' = -23·5 - 27·1 = -50·6$

$J_{36}' = 48·6 - 1·9 = 46·7$ ($J_{36}' + J_{96}' + J_{56}' = 0$)

$J_{96}' = 1·9 + 12·6 = 14·5$

$J_{56}' = -12·6 - 48·6 = -61·2.$

Rückverlegung von J_4 und J_6.

$J_{14} = 34·3 + 60·0 =$ **94·3** ($J_{I1} + J_{41} + J_{51} + J_{31} = 240 = J_1'$

$J_{74} = 16·3 + 60·0 =$ **76·3** $J_{I3} + J_{13} + J_{53} + J_{63} = 190 = J_3'$

$J_{54} = -50·6 + 30·0 =$ **− 20·6** u. s. w.)

$J_{36} = 46·7 + 33·3 =$ **80·0**

$J_{96} = 14·5 + 8·4 =$ **22·9**

$J_{56} = -61·2 + 8·3 =$ **− 52·9.**

19. Rückkehr zu Stern 2 und 8 (Fig. 106 u. 105).

$J_{12}' = 54·2 - 8·6 = 45·6$ ($J_{12}' + J_{32}' + J_{52}' = 0$)

$J_{32}' = 8·6 + 58·5 = 67·1$

$J_{52}' = -58·5 - 54·2 = -112·7$

$J_{78}' = 23·5 - 13·8 = 9·7$ ($J_{78}' + J_{98}' + J_{58}' = 0$)

$J_{98}' = 13·8 + 30·3 = 44·1$

$J_{58}' = -30·3 - 23·5 = -53·8.$

Rückverlegung von J_2 und J_8.

$J_{12} = 45·6 + 40 =$ **85·6** ($J_{I1} + J_{21} + J_{41} = 200 = J_1$

$J_{32} = 67·1 + 40 =$ **107·1** u. s. w.)

$J_{52} = -112·7 + 20 =$ **− 92·7**

$J_{78} = 9·7 + 40 =$ **49·7**

$J_{98} = 44·1 + 40 =$ **84·1**

$J_{58} = -53·8 + 20 =$ **− 33·8.**

Die Stromverteilung ist in Fig. 113 dargestellt. Danach berechnen sich Spannungsverluste in den Knotenpunkten zu

$$\varepsilon_1 = 0{\cdot}95;\quad \varepsilon_2 = 1{\cdot}38;\quad \varepsilon_3 = 0{\cdot}84;\quad \varepsilon_4 = 1{\cdot}89;\quad \varepsilon_5 = 2{\cdot}30;\quad \varepsilon_6 = 1{\cdot}24;$$
$$\varepsilon_7 = 1{\cdot}13;\quad \varepsilon_8 = 1{\cdot}63;\quad \varepsilon_9 = 0{\cdot}79.$$

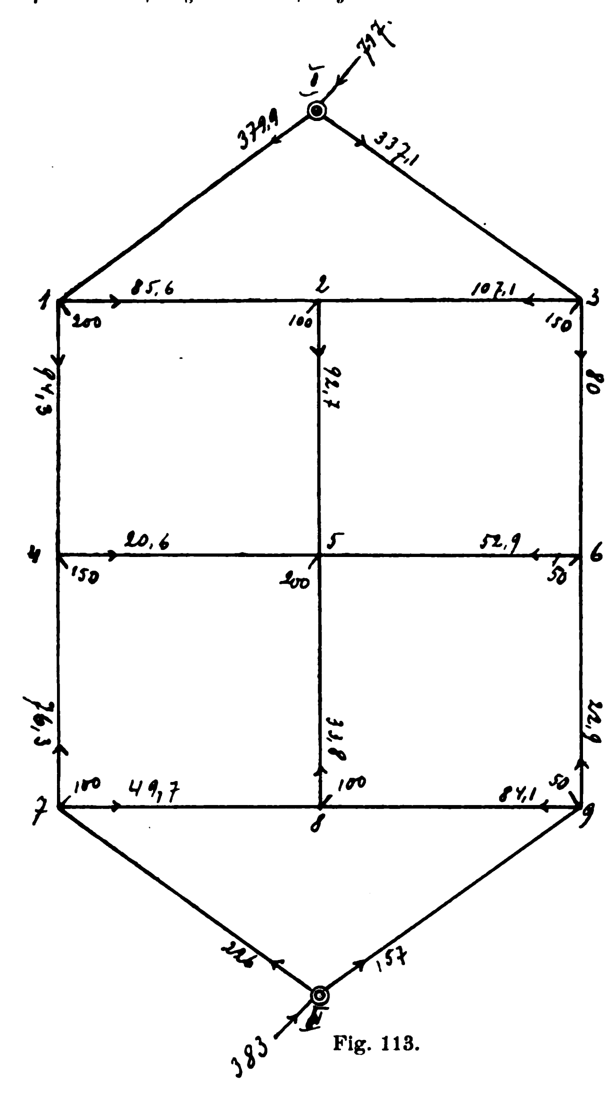


Fig. 113.

Zum Vergleich wollen wir dasselbe Netz mit der gleichen Genauigkeit 5 %) nach der Spannungsmethode mittels des Gaussschen Verfahrens [82] rechnen. Wir erhalten dann die Leitfähigkeiten:

= 700	$g_{12} = 200$	$g_{13} = 0$	$g_{14} = 100$	$g_{15} = 0$	$g_{16} = 0$	$g_{17} = 0$	$g_{18} = 0$	$g_{19} = 0$
	$g_{22} = 500$	$g_{23} = 200$	$g_{24} = 0$	$g_{25} = 100$	$g_{26} = 0$	$g_{27} = 0$	$g_{28} = 0$	$g_{29} = 0$
		$g_{33} = 800$	$g_{34} = 0$	$g_{35} = 0$	$g_{36} = 200$	$g_{37} = 0$	$g_{38} = 0$	$g_{39} = 0$
			$g_{44} = 250$	$g_{45} = 50$	$g_{46} = 0$	$g_{47} = 100$	$g_{48} = 0$	$g_{49} = 0$
				$g_{55} = 250$	$g_{56} = 50$	$g_{57} = 0$	$g_{58} = 50$	$g_{59} = 0$
					$g_{66} = 300$	$g_{67} = 0$	$g_{68} = 0$	$g_{69} = 50$
						$g_{77} = 400$	$g_{78} = 100$	$g_{79} = 0$
							$g_{88} = 250$	$g_{89} = 100$
								$g_{99} = 350$

und daraus das Gleichungssystem:

$$
\begin{array}{rrrrrrrrrrcr}
1200\,\varepsilon_0 & -400\,\varepsilon_1 & - & -400\,\varepsilon_3 & - & - & - & -200\,\varepsilon_7 & - & -200\,\varepsilon_9 & = & -1100 \\
-400\,\varepsilon_0 & +700\,\varepsilon_1 & -200\,\varepsilon_2 & - & -100\,\varepsilon_4 & - & - & - & - & - & = & 200 \\
- & -200\,\varepsilon_1 & +500\,\varepsilon_2 & -200\,\varepsilon_3 & - & -100\,\varepsilon_5 & - & - & - & - & = & 100 \\
-400\,\varepsilon_0 & - & -200\,\varepsilon_2 & +800\,\varepsilon_3 & - & - & -200\,\varepsilon_6 & - & - & - & = & 150 \\
- & -100\,\varepsilon_1 & - & - & +250\,\varepsilon_4 & -50\,\varepsilon_5 & - & -100\,\varepsilon_7 & - & - & = & 150 \\
- & - & -100\,\varepsilon_2 & - & -50\,\varepsilon_4 & +250\,\varepsilon_5 & -50\,\varepsilon_6 & - & -50\,\varepsilon_8 & - & = & 200 \\
- & - & - & -200\,\varepsilon_3 & - & -50\,\varepsilon_5 & +300\,\varepsilon_6 & - & - & -50\,\varepsilon_9 & = & 50 \\
-200\,\varepsilon_0 & - & - & - & -100\,\varepsilon_4 & - & - & +400\,\varepsilon_7 & -100\,\varepsilon_8 & - & = & 100 \\
- & - & - & - & - & -50\,\varepsilon_5 & - & -100\,\varepsilon_7 & +250\,\varepsilon_8 & -100\,\varepsilon_9 & = & 100 \\
-200\,\varepsilon_0 & - & - & - & - & - & -50\,\varepsilon_6 & - & -100\,\varepsilon_8 & +350\,\varepsilon_9 & = & 50.
\end{array}
$$

Die Näherungswerte sowie die gesamte Rechnung sind in der folgenden Tabelle IX zusammengestellt.

Es geht hieraus hervor, dass die Rechnung nach dem letzten Verfahren in einem geringen Bruchteil der Zeit zu bewältigen ist, die für die Methode der widerstandslosen Umbildung des Netzes aufzuwenden ist.

93. **Vergleich der Frick-Kenelly-schen mit der Spannungsmethode.**

Zur allgemeinen Charakterisierung des FRICK-KENELLYschen Verfahrens wäre noch zu bemerken, dass die Auflösung des Zwei- und Dreiecks in eine Gerade bezw. einen Stern der rechnerischen Elimination eines Stroms in den Gleichungen der Strommethode, die Auflösung eines Sterns in ein Dreieck der rechnerischen Elimination eines Knotenpunkts-Spannungsverlustes in den Gleichungen der Spannungsmethode entspricht. Während aber die Auflösung des Gleichungssystems der letzten Methode durch das GAUSSsche Näherungsverfahren ausserordentlich vereinfacht und von der Erfahrung des Rechnenden fast unabhängig gemacht wird, ist der günstigste und am schnellsten zum Ziele führende Weg für die widerstandstreue Netzumbildung bei der Vielheit der möglichen Lösungen durchaus dem Überblick und der Geschicklichkeit des Projektierenden überlassen. Dagegen hat die letzte Methode vor der Spannungsmethode den Vorteil der grösseren Anschaulichkeit und des klareren Einblicks in die Entstehung der Stromverteilung abhängig von dem Leitungsquerschnitt und der Belastung der einzelnen Knotenpunkte voraus, da durch sie die Möglichkeit gegeben ist, die Entstehung der komplizierteren aus den einfacheren Gebilden zu verfolgen. Dass sie aber in Hinsicht auf Rechenaufwand sowie Bequemlichkeit der Rechnungen sowohl dem VERHOECKXschen als besonders dem GAUSSschen Verfahren bedeutend nachsteht, lehrt am besten das vorher berechnete Beispiel.

Die Vereinfachung grosser Netze.

94. **Netzteilung.**

Kann man in einem Netze, das ein grösseres Verteilungsgebiet mit Strom zu versorgen hat, einzelne Teile — „Bezirke" —, ohne andere Leiter zu schneiden, durch widerstandslose Verbindung von Speisepunkten abgrenzen, so sind unter der Voraussetzung gleichen Potentials der letzteren diese Bezirke voneinander vollständig unabhängig, ihre Strom- und Spannungsverteilung kann also gesondert bestimmt werden. Ist diese natürliche Unterteilung in Bezirke nicht möglich oder enthalten solche Bezirke noch sehr viele Knotenpunkte, so dass eine unbequem grosse Zahl von Gleichungen zu lösen ist, so kann man oft dadurch kleinere Bezirke bilden, dass man Verbindungen zwischen Speisepunkten herstellt, die nur wenige —

Tabelle IX.

	ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	ε_9	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9
1	— 0·8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 11000	2000	1000	1500	1500	2000	500	1000	1000	500
2	—	—	—	—	—	1·0	—	—	—	—	— 1400	— 1200	1000	— 1700	1500	2000	500	— 600	1000	— 1100
3	—	—	—	—	1·0	—	—	—	—	—	— 1400	— 1200	2000	— 1700	2000	— 500	1000	— 600	1500	— 1100
4	—	—	—	—	—	—	—	—	0·6	—	— 1400	— 200	2000	— 1700	— 500	0	1000	400	1500	— 1100
5	—	—	0·4	—	—	—	—	—	—	—	— 1400	— 200	2000	— 1700	— 500	300	1000	1000	0	— 500
6	—	—	—	—	—	—	0·4	—	—	—	— 1400	600	0	— 900	— 500	700	1000	1000	0	— 500
7	—	—	—	—	—	0·4	—	—	—	—	— 1400	600	0	— 100	— 500	900	— 200	1000	0	— 300
8	—	—	—	—	—	—	—	0·3	—	—	— 1400	600	400	— 100	— 800	— 100	0	1000	200	— 300
9	—	—	—	—	—	—	—	—	0·2	—	— 800	600	400	— 100	0	— 100	0	— 200	500	— 300
10	—	0·1	—	—	—	—	—	—	—	—	— 800	600	400	— 100	0	0	0	0	0	— 100
11	—	—	0·1	—	—	—	—	—	—	—	— 400	— 100	600	— 100	100	0	0	0	0	— 100
12	— 0·04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 400	100	100	100	100	100	0	0	0	— 100
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	— 0·05	80	— 60	100	— 60	100	100	0	— 80	0	— 180
14	—	—	—	—	—	0·04	—	—	—	—	— 20	— 60	100	— 60	100	100	— 25	— 80	— 50	— 5
15	—	—	—	—	0·05	—	—	—	—	—	— 20	— 60	140	— 60	120	0	— 5	— 80	— 30	— 5
16	—	—	0·03	—	—	—	—	—	—	—	— 20	— 10	140	— 60	— 5	25	— 5	— 30	— 30	— 5
17	—	—	—	—	—	0·02	—	—	—	—	— 20	50	— 10	0	— 5	55	— 5	— 30	— 30	— 5
18	—	—	—	—	—	—	—	— 0·01	—	—	— 20	50	10	0	5	5	5	— 30	— 20	— 5
19	—	—	—	—	—	—	—	—	— 0·01	—	— 40	50	10	0	— 5	5	5	10	— 30	— 5
20	—	0·01	—	—	—	—	—	—	—	—	— 40	50	10	0	— 5	0	5	0	— 5	— 15
21	—	—	0·01	—	—	—	—	—	—	—	0	— 20	30	0	5	0	5	0	— 5	— 15
	— 0·84	0·11	0·54	0·00	1·05	1·46	0·40	0·29	0·79	— 0·05	0	0	— 20	20	5	10	5	0	— 5	— 15
	— ε_0 =	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84	0·84										
		0·95	1·38	0·84	1·89	2·30	1·24	1·13	1·63	0·79										

eine oder zwei — Leitungen schneiden. Man berechnet diese kleineren Bezirke unter vorläufiger Vernachlässigung der geschnittenen Leiter mit mässiger Annäherung zunächst für sich und rechnet erst dann mit den so erhaltenen Näherungswerten der Knotenpunktsverluste das Netz als Ganzes durch.

So würde das Netz nach Fig. 114 ohne weiteres eine Teilung in drei Bezirke ermöglichen, von denen der grössere *I II IV III VII I* unter vorläufiger

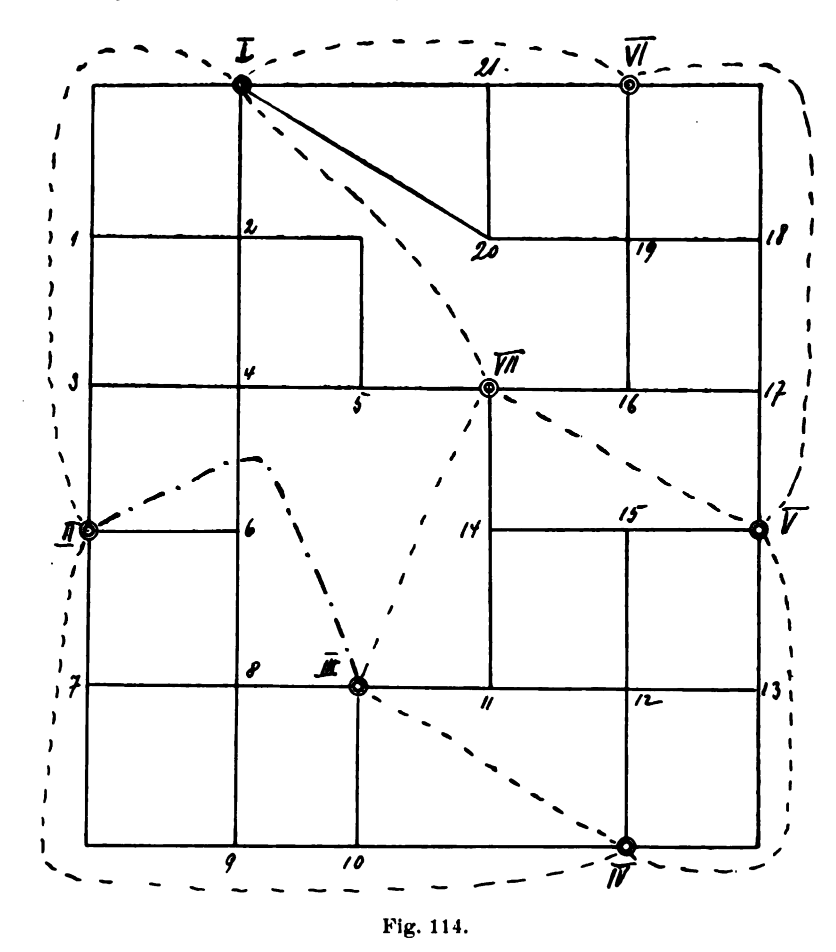


Fig. 114.

Vernachlässigung der Strecke 4 6 in zwei kleinere geteilt werden kann, die nach Bestimmung der ersten Annäherungen für ε_1 bis ε_{10} wieder gemeinsam als Ganzes zu behandeln sind.

Die Netzberechnung auf Ausgleich.

95. Wesen der Ausgleichsrechnung.

Ist nun durch die Bestimmung der Strom- und Spannungsverteilung an einem vorliegenden Netz dargethan, dass es bei maximaler Belastung den Anforderungen der Elastizität entspricht, d. h. dass an keiner Stelle desselben der Spannungsverlust eine bestimmte, durch die Bedingung der Elastizität vorgeschriebene Grösse überschreitet, und dass die Stromdichte der Leiter

den Bedingungen der Feuersicherheit genügt, so ist schliesslich die Frage zu prüfen, ob diese Voraussetzungen auch noch erfüllt sind, wenn die Belastung des Netzes sich ändert (verringert).

Bisher wurde stets angenommen, dass die Speisepunkte gleiches Potential besitzen, und das ist bei voller Belastung auch der Fall, wenn, wie es in der Praxis stets geschieht, die Speiseleitungen so bemessen werden, dass sie bei Zuführung des auf jeden Speisepunkt entfallenden Stromes den gleichen Spannungsverlust ergeben. Ändert sich aber die Belastung an einer oder mehreren Verbrauchsstellen, so tritt eine andere Stromverteilung als die für volle Belastung berechnete ein; die Folge ist, dass die Speiseleitungsströme ebenfalls eine Änderung erfahren, die natürlich im allgemeinen nicht proportional den Leitungswiderständen ist, so dass nunmehr die Potentiale der Speisepunkte verschiedene Werte annehmen werden.

Wären nun die Spannungsverluste in den Speisekabeln so bemessen, dass bei maximaler Belastung die durch die Netzelastizität bedingte Grenze nicht überschritten wird ($\varepsilon_s \leq 0{\cdot}03\ \mathcal{E}$), so könnte auch bei geringerer Stromentnahme die Grenze nicht überschritten werden. In der Praxis werden jedoch für die Speisekabel wesentlich grössere Verluste zugelassen, da andernfalls die Kosten des Netzes zu hoch werden würden. Dagegen wird

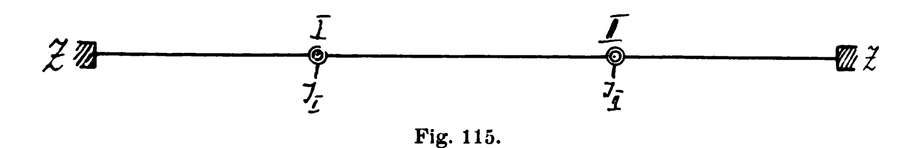


Fig. 115.

durch Regelung der Maschinenspannung die Spannung an den Speisepunkten konstant gehalten, und zwar entweder an jedem einzelnen, wozu wiederum teure Regulierapparate für jede einzelne Speiseleitung notwendig sind, die ausserdem den Betrieb komplizieren, oder, wie es allgemein bei grösseren Netzen geschieht, an einzelnen wenigen Gruppen von Speisepunkten oder auch nur an allen zugleich, indem die mittlere Netzspannung auf der gewünschten Höhe erhalten wird. In diesem Falle verlieren die Speisepunkte offenbar den Charakter von solchen und nehmen den einfacher Knotenpunkte an, während die Punkte gleichen — wenn auch infolge der Regelung der Speisepunkte auf mittlere Spannung nicht konstanten — Potentials nunmehr an die auf der Sammelschiene der Centrale vereinigten Enden der Speisekabel rücken. Auch für diesen Fall können wir die entsprechenden Gleichungen gemäss [76] mit den Spannungsverlusten an den Knoten- und Speisepunkten als Unbekannten aufstellen und werden dann vermittels der Grössen $\varrho_{\mu\nu}$, die wir gelegentlich der VERHOECKXschen Methode [83] kennen gelernt haben, zu einfachen Beziehungen für den Ausgleich kommen [101 ff.]. Um die für die Ausgleichsrechnungen wichtigen Grössen abzuleiten, werden wir jedoch zunächst den einfachsten Fall betrachten, nämlich den Ausgleich zwischen zwei belasteten Speisepunkten.

96. Ausgleich zwischen zwei belasteten Speisepunkten.

Es sei (Fig. 115) $Z\,I\,II\,Z$ die Darstellung eines einfachsten Netzes mit den Speisepunkten I und II, den Speiseleitungen $Z\,I$ und $Z\,II$ und der Verteilungsleitung $I\,II$, in der bei voller Belastung der maximale Spannungsverlust nicht überschritten wird. Die für den letzten Fall sich ergebenden Speisepunktsbelastungen J_I und J_{II} seien allein an den Punkten I und II

wirkend gedacht; der Widerstand der Speiseleitungen w_I und w_{II} ist so bemessen, dass

$$w_I J_I = w_{II} J_{II} = \varepsilon_s \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (158)$$

da ja die Speiseleitungsströme $J_{0I} = J_I$ und $J_{0II} = J_{II}$ werden.

Vermindert sich nun die Netzbelastung von $J_I + J_{II}$ auf den Wert $J_I' + J_{II}'$, wobei $J_I' = \eta_I J_I$ und $J_{II}' = \eta_{II} J_{II}$ diejenigen, ebenfalls an I und II angreifenden Teilströme sind, die die Speisepunkte bei äquipotentieller Übertragung der Einzellasten auf sie zu liefern hätten, also dann, wenn sie gleiches Potential hätten, und η_I und η_{II} der Bedingung unterworfen sind:

$$0 \leq \eta \leq 1,$$

so können wir ohne weiteres nach dem Früheren [**63** oder **65**] mit Hilfe der bekannten Leiterwiderstände w_I, w_{II} und w_{III} die neue Stromverteilung berechnen. Es seien $i_{0I} = \gamma_I J_I$ und $i_{0II} = \gamma_{II} J_{II}$ die beiden durch ZI und ZII fliessenden Teilströme, dann sind auch die Grössen γ der Bedingung unterworfen:

$$0 \leq \gamma \leq 1.$$

Man erkennt dies aus folgender Überlegung: Es ist, wenn wir $w_I + w_{II} + w_{III} = w_{00}$ setzen:

$$i_{0I} = \frac{w_{00} - w_I}{w_{00}} J_I' + \frac{w_{II}}{w_{00}} J_{II}'$$

oder

$$\gamma_I J_I = \left(1 - \frac{w_I}{w_{00}}\right) \eta_I J_I + \frac{w_{II}}{w_{00}} \eta_{II} J_{II}$$

$$\gamma_{II} J_{II} = \frac{w_I}{w_{00}} \eta_I J_I + \left(1 - \frac{w_{II}}{w_{00}}\right) \eta_{II} J_{II},$$

also

$$\gamma_I J_I + \gamma_{II} J_{II} = \eta_I J_I + \eta_{II} J_{II}$$

$$\gamma_I J_I - \gamma_{II} J_{II} = \left(1 - 2\frac{w_I}{w_{00}}\right) \eta_I J_I - \left(1 - 2\frac{w_{II}}{w_{00}}\right) \eta_{II} J_{II},$$

daher unter Berücksichtigung, dass $w_I J_I = w_{II} J_{II}$ ist:

$$\left.\begin{aligned} \gamma_I &= \eta_I - \frac{w_I}{w_{00}} (\eta_I - \eta_{II}) \\ \gamma_{II} &= \eta_{II} - \frac{w_{II}}{w_{00}} (\eta_{II} - \eta_I) \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (159)$$

Da nun η_{II} und η_I zwischen 0 und 1 schwanken können, $\frac{w_I}{w_{00}}$ und $\frac{w_{II}}{w_{00}}$ aber echte Brüche sind, so folgt für die Grenzwerte der η

$$0 \leq \gamma \leq 1.$$

Es ist weiterhin auch ersichtlich, dass γ die Grenzen 0 und 1 nur erreichen kann, einerseits wenn zugleich η_I und η_{II} verschwinden, d. h. wenn überhaupt keine Belastung vorhanden ist, und andererseits, wenn

$$\eta_I = \eta_{II} = 1,$$

d. h. bei voller Belastung.

Ferner ist unter Berücksichtigung von Gleichung (158)

$$\varepsilon_I = i_{0I}\, w_I = \gamma_I\, \varepsilon_s; \quad \varepsilon_{II} = i_{0II}\, w_{II} = \gamma_{II}\, \varepsilon_s \quad . \quad . \quad . \quad (160)$$

daher wird

$$\varepsilon_{III} = \varepsilon_{II} - \varepsilon_I = \varepsilon_s\,(\gamma_{II} - \gamma_I) = \varepsilon_s\,(\eta_{II} - \eta_I)\left(1 - \frac{w_I + w_{II}}{w_{00}}\right) \quad (161)$$

Die Gleichheit der Potentiale in I und II ist also nunmehr, wie bereits die allgemeine Betrachtung ergab, gestört und daher fliesst in III ein Strom

$$J_{III} = \frac{\varepsilon_{III}}{w_{III}} = i_I - J_I' = J_I\,(\gamma_I - \eta_I) = J_I\,(\eta_{II} - \eta_I)\,\frac{w_I}{w_{00}} \quad . \quad (162)$$

Wenn aber

$$\eta_I = \eta_{II} = \eta,$$

d. h. wenn die Belastung an beiden Speisepunkten in gleichem Verhältnis fällt, so wird auch

$$\gamma_I = \gamma_{II} = \gamma = \eta \text{ und } \varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \gamma\,\varepsilon_s,\ \varepsilon_{III} = 0 \text{ und } J_{III} = 0,$$

wie aus den Gleichungen (159) bis (162) folgt, d. h. der Spannungsverlust ist in beiden Speisekabeln, wie bei voller Belastung, der gleiche und gleich

Fig. 116.

dem γ- bezw. η-fachen von ε_s. Da aber die Spannung an den Speisepunkten konstant erhalten wird, so ist in diesem Falle durch die Veränderung der Belastung überhaupt keine Wirkung auf das Verteilungsnetz merkbar.

Aus der Gleichung (162) können wir auch die Beziehung ableiten:

$$i_{0I} = J'_I + J_{III}$$
$$i_{0II} = J'_{II} - J_{III}$$

d. h. die Speisekabel führen ausser den von ihnen zu liefernden Belastungsströmen der Speisepunkte noch einen Kreisstrom J_{III} (s. Fig. 116), der sich den ersteren überlagert. Zwischen I und II fliesst nur dieser Kreisstrom J_{III} und durch ihn wird eben der Spannungsunterschied ε_{III} zwischen I und II hervorgerufen.

Setzen wir

$$\bar{\varepsilon}_{III} = J'_{II}\, w_{II} - J'_I\, w_I = \varepsilon_s\,(\eta_{II} - \eta_I) \quad . \quad . \quad . \quad (163)$$

bezeichnen wir also mit $\bar{\varepsilon}_{III}$ denjenigen Potentialunterschied, der zwischen den Punkten I und II herrschen würde, wenn keine Verbindung zwischen ihnen vorhanden wäre, so erhalten wir aus Gleichung (161)

also

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{III} &= J_{III}\, w_{III} = \bar{\varepsilon}_{III}\left(1 - \frac{w_I + w_{II}}{w_I + w_{II} + w_{III}}\right) \\ \frac{\varepsilon_{III}}{\bar{\varepsilon}_{III}} &= \frac{w_{III}}{w_I + w_{II} + w_{III}} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad (164)$$

und

$$\bar{\varepsilon}_{III} = J_{III}\,(w_I + w_{II} + w_{III}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (165)$$

Aus Gleichung (164) ist ersichtlich, dass $\varepsilon_{I\,II} < \bar{\varepsilon}_{I\,II}$. Wir können also mit Berücksichtigung von Gleichung (165) sagen: $\bar{\varepsilon}_{I\,II}$ ist diejenige Spannung, die den Kreisstrom $J_{I\,II}$ in dem Gesamtwiderstand des Kreises $w_I + w_{II} + w_{I\,II}$ hervorruft; durch ihn wird der Potentialunterschied $\bar{\varepsilon}_{I\,II}$, der zwischen den Punkten *I* und *II* bei offenem Stromkreise herrschen würde, auf den geringeren Wert $\varepsilon_{I\,II}$ herabgedrückt.

$J_{I\,II}$ wird daher der „Ausgleichsstrom"[1] genannt, weil er die zwischen zwei nicht miteinander verbundenen Punkten eines Netzes herrschende Potentialdifferenz $\bar{\varepsilon}_{I\,II}$ infolge ihrer Verbindung durch eine Leitung vom Widerstande $w_{I\,II}$ auf den Wert $\varepsilon_{I\,II}$ „ausgleicht".

Wir erkennen also aus den bisher entwickelten Gleichungen das Folgende: Wird die Stromentnahme eines nur an den Speisepunkten belasteten Netzes geändert (vermindert), so entstehen zwischen den letzteren Potentialunterschiede, wenn $\eta_I \gtrless \eta_{II}$ (Gleichung 161). Diese sind am grössten, wenn keine Verteilungsleitungen zwischen ihnen vorhanden sind [Gleichungen (163) und (164)]. $\varepsilon_{I\,II}$ wird um so grösser, je grösser ε_s und je grösser $\eta_{II} - \eta_I$, nimmt also bei gegebenem ε_s seinen grössten Wert ($= \varepsilon_s$) an, wenn ent-

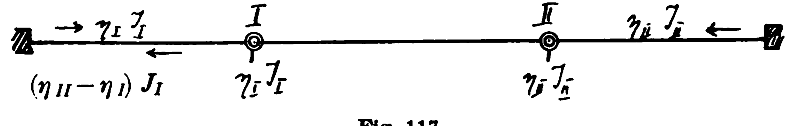


Fig. 117.

weder η_I oder η_{II} verschwindet, während entsprechend η_{II} oder η_I seinen Maximalwert 1 erhält, d. h. wenn die Belastung von *I* oder *II* gleich Null wird, während gleichzeitig diejenige von *II* bezw. *I* ihr Maximum erreicht.

Da die Maschinenspannung so geregelt wird, dass die mittlere Netzspannung $\frac{1}{2}(E_I + E_{II})$ die gewünschte Grösse erhält, so kann demnach, wenn nur die Speisepunkte belastet sind, im äussersten Falle der zulässige Spannungsverlust überschritten werden, wenn

$$\varepsilon_s > 2\,\varepsilon_{max}, \text{ d. h. } \varepsilon_s > 2 \cdot 0{\cdot}03\,\mathcal{E}$$

ist. In diesem Falle kann jedoch der Spannungsverlust durch Verbindung der Speisepunkte durch eine Leitung *I II*, die „Ausgleichsleitung", auf jedes gewünschte Mass (mit Ausschluss von Null) ausgeglichen werden, indem $w_{I\,II}$ den entsprechenden Wert erhält.

Wie die Gleichungen (161) und (163) lehren, hängt die thatsächlich eintretende Potentialdifferenz $\varepsilon_{I\,II}$ ebenso wie $\bar{\varepsilon}_{I\,II}$ nicht von den absoluten Änderungen der beiden Belastungen J_I und J_{II}, sondern von der Differenz $\eta_{II} - \eta_I$ ab, wie auch daraus erhellt, dass wir jede Belastungsänderung in zwei solche zerlegen können (vgl. Fig. 117), von denen die eine: proportionale

[1] Die erste Arbeit über Ausgleichsleitungen, die zugleich die Bezeichnungen „Ausgleichsleitungen, Spannungsausgleich" festlegt, rührt von C. DIHLMANN her: Über Disposition und über Berechnung von Leitungsnetzen ... ETZ 1889, S. 148. Vgl. auch ARTHUR LIETKE: Über die Berechnung des Ausgleichs ... ETZ 1892, S. 426; J. TEICHMÜLLER, Die Ausgleichsleitungen ... ETZ 1901, S. 229, dessen Darstellung wir hier für einfache Verteilungsleiter im wesentlichen folgen, sowie auch B. SOSCHINSKI, Die Ausgleichsrechnungen in geschlossenen Leitungsnetzen ... ETZ 1905, S. 1069.

Verminderung von J_{II} auf $\eta_{II} J_{II}$ und von J_I auf $\eta_{II} J_I \, (\eta_{II} > \eta_I)$ die Potentiale von I und II infolge der Regelung der Maschinenspannung überhaupt nicht berührt, während die zweite, den Punkt I allein betreffende Änderung von $\eta_{II} J_I$ auf $\eta_I J_I$, also der Gegenstrom

$$\Delta J_I = (\eta_{II} - \eta_I) \, J_I$$

die Potentialdifferenz

$$\bar{\varepsilon}_{I\,II} = \bar{\varepsilon}_{II} - \bar{\varepsilon}_I = 0 - (-\Delta J_I w_I) = \Delta J_I w_I$$

hervorruft, die infolge $w_{I\,II}$ auf $\varepsilon_{I\,II}$ ausgeglichen wird oder werden soll. Wir können also, ohne die Allgemeinheit der Untersuchung zu beschränken, bei Ausgleichsrechnungen stets annehmen, dass nur der oder die untersuchten Punkte Änderungen unterliegen, während alle anderen voll belastet sind. Dann wird also $\eta_{II} = 1$ und $1 - \eta_I = u_I$ die in Teilen von J_I ausgedrückte Belastungsänderung, und es ist

$$\Delta J_I = (1 - \eta_I) \, J_I = u_I \, J_I$$

derjenige negative Teilstrom von J_I, der (bei offenem Stromkreise) die Erhöhung des Potentials von I gegenüber II verursacht:

$$\bar{\varepsilon}_{I\,II} = \Delta J_I w_I = u_I J_I w_I = u_I p_s \, \mathcal{E} \quad . \; . \; . \; . \; (166)$$

wobei

$$J_I w_I = \varepsilon_s = p_s \, \mathcal{E}$$

gesetzt worden ist. Drücken wir auch $\varepsilon_{I\,II}$ in Prozenten von $\mathcal{E}$ aus, indem wir

$$\varepsilon_{I\,II} = p \, \mathcal{E}$$

schreiben, so erhalten wir:

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{I\,II}}{\varepsilon_{I\,II}} = \frac{u_I}{p} \, p_s = a_{I\,II} \, p_s \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (167)$$

worin die Grösse

$$a_{I\,II} = \frac{u_I}{p} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (168)$$

nach Teichmüller[1]) der „Ausgleich“ des Punktes I in bezug auf II genannt wird, und diejenige prozentuale Verminderung darstellt, die die Belastung des Punktes I bei sonst unveränderten Netzverhältnissen erfahren muss, um eine thatsächliche Potentialdifferenz zwischen I und II von $1\,^0/_0$ der Netzspannung hervorzurufen. Die Grösse des Ausgleichs ist durch die Gleichung (168) eindeutig bestimmt, und zwar ist

$$a_{I\,II} = \frac{u_I}{p}$$

zu wählen, wenn als grösste Belastungsänderung des Punktes I der Betrag $u_I J_I$ zu erwarten ist und eine grösste Potentialdifferenz von $\varepsilon_{I\,II} = p \, \mathcal{E}$ zwischen I und II zugelassen wird. Im besonderen wird für $p = 0{\cdot}01$ der Ausgleich gleich der prozentualen Belastungsänderung:

$\eta_I)$ 100.

1) V[illegible] [illegible]. 310.

$a_{I\,II}$ ist also eine Grösse, die ebenso wie $\varepsilon_{I\,II}$ charakteristisch für den Ausgleich des Netzes ist. Während $\varepsilon_{I\,II}$ eine bestimmte Grösse nicht übersteigen darf, darf $a_{I\,II}$ einen bestimmten Wert nicht unterschreiten, soll das Netz unter allen Bedingungen seinen Zweck, den Lampen Strom von innerhalb geringer Grenzen konstanter Spannung zuzuführen, genügen.

Aus den Gleichungen (164) und (167) folgt die Hauptgleichung für die Bestimmung der Ausgleichsgrösse gegebener Netze:

$$a_{I\,II} = \frac{w_I + w_{II} + w_{I\,II}}{w_{I\,II}} \cdot \frac{1}{p_s} = [(w_I + w_{II})\, g_{I\,II} + 1]\, \frac{1}{p_s} \quad \text{(XXVIII)}$$

und aus Gleichung (168) der $a_{I\,II}$ entsprechende thatsächlich vorhandene Potentialunterschied zwischen I und II:

$$p = \frac{u_I}{a_{I\,II}} \text{ bezw. } \varepsilon_{I\,II} = p\,\mathcal{E} = \frac{u_I}{a_{I\,II}}\,\mathcal{E} \quad . \quad . \quad \text{(XXIX)}$$

Schreiben wir Gleichung (XXVIII) mit TEICHMÜLLER[1]) in der Form:

$$a_{I\,II} = \frac{1}{2}\,[g_I + (1 + f_{II\,I})\, g_{I\,II}]\, \frac{E^2}{\mathfrak{E}_I} \quad . \quad . \quad \text{(XXVIII a)}$$

die erhalten wird, wenn

$$p_s = \frac{2\, J_I\, w_I}{E} = \frac{2\, \mathfrak{E}_I\, w_I}{E^2}$$

und

$$f_{II\,I} = \frac{w_{II}}{w_I}$$

in die Gleichung (XXVIII) eingesetzt wird, wobei $\mathfrak{E}_I$ die von der Speiseleitung I zu übertragende Energie und E die Netzspannung bedeutet, so sehen wir, dass bei gegebenen Netzwiderständen der Ausgleich mit dem Quadrat der Netzspannung und umgekehrt proportional zu der von der Leitung zu übertragenden Leistung wächst. Soll ferner bei gegebenem E und $\mathfrak{E}$ der Ausgleich verbessert werden, so ist dies nur dadurch möglich, dass $g_{I\,II}$, g_I und g_{II}, also die Leiterquerschnitte vergrössert werden, wobei $f_{II\,I}$ unter allen Umständen unverändert bleibt, da infolge Gleichung (158) stets

$$\frac{w_{II}}{w_I} = \frac{J_I}{J_{II}}$$

sein muss. Schliesslich erhellt noch aus der Gleichung (XXVIII a), dass die Vergrösserung von $g_{I\,II}$ wesentlich mehr zur Verbesserung des Ausgleichs beiträgt, als die Vergrösserung von g_I und g_{II} bezw. die Verkleinerung von p_s.

Was schliesslich die Berechnung der den Ausgleichsgrössen entsprechenden Leiterquerschnitte betrifft, so sind in der Praxis zwei Fälle zu unterscheiden: Entweder sollen bei einem zu projektierenden Netze die auf Verteilung berechneten Leitungen auf Ausgleich nachgeprüft und für den Fall, dass sie nicht genügen, die stärkeren Querschnitte ermittelt werden, oder es stellt sich bei einem vorhandenen, in Betrieb befindlichen Netze eine zu grosse Potentialdifferenz zwischen zwei Speisepunkten heraus, und es soll eine un-

1) ETZ 1901, S. 231.

mittelbare Verbindung, eine Ausgleichsleitung zwischen ihnen verlegt werden, deren Querschnitt zu berechnen ist.

Im ersten Falle ist (Fig. 116) die Belastungsänderung u_I und die zulässige Potentialdifferenz $\varepsilon_{I\,II}$ und damit nach Gleichung (168) auch der Ausgleich $a_{I\,II}$ gegeben bezw. gefordert. Der Mindestquerschnitt des Leiters $I\,II$ ergiebt sich daher aus Gleichung (XXVIII). Es ist:

$$\left.\begin{aligned} g_{I\,II} &= \frac{1}{w_{I\,II}} = \frac{a_{I\,II}\,p_s - 1}{w_I + w_{II}} \\ q_{I\,II} &= \frac{a_{I\,II}\,p_s - 1}{w_I + w_{II}}\, l_{I\,II}\,\varrho \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad \text{(XXX)}$$

Ist der auf Verteilung berechnete Querschnitt kleiner, so muss er auf diesen letzten Wert verstärkt werden.

Im zweiten Falle ist $g_{I\,II}$ und u_I gegeben. Die mit Hilfe der Gleichungen (XXVIII) und (XXIX) ermittelten Ausgleichsgrössen $a_{I\,II}$ und p bezw. $\varepsilon_{I\,II} = p\,\mathcal{E}$ genügen nicht und sollen dadurch auf $a'_{I\,II}$ erhöht bezw. auf $\varepsilon'_{I\,II}$

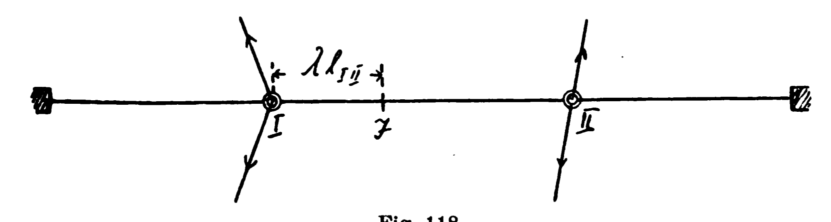


Fig. 118.

herabgedrückt werden, dass eine weitere Verbindung zwischen $I\,II$ von der Leitfähigkeit $g'_{I\,II}$ verlegt wird. Dann giebt Gleichung (XXVIII) für die beiden Ausgleichsgrössen:

$$a'_{I\,II} = [(w_I + w_{II})\,(g_{I\,II} + g'_{I\,II}) + 1]\,\frac{1}{p_s}$$

$$a_{I\,II} = [(w_I + w_{II})\,g_{I\,II} + 1]\,\frac{1}{p_s}$$

also durch Subtraktion

$$\Delta a_{I\,II}\,p_s = (a'_{I\,II} - a_{I\,II})\,p_s = (w_I + w_{II})\,g'_{I\,II}$$

woraus

$$\left.\begin{aligned} g'_{I\,II} &= \frac{\Delta a_{I\,II}\,p_s}{w_I + w_{II}} \\ q'_{I\,II} &= \frac{\Delta a_{I\,II}\,p_s}{w_I + w_{II}}\, l_{I\,II}\,\varrho \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad \text{(XXXI)}$$

folgt.

Die Gleichungen (XXVIII) bis (XXXI) bilden die Hauptgleichungen für Ausgleichsberechnungen.

97. Ausgleich bei mit nur einer Stromentnahme belasteten Verteilungsleitungen.

Betrachten wir nunmehr den Fall, dass ausser den Strömen J_I und J_{II}, die entweder unmittelbar bei I und II oder in anderen von I und II abgezweigten Leitern verbraucht werden können, eine einzige Abzweigung J auf der Strecke $I\,II$ vorhanden ist, und zwar in der Entfernung

$$\lambda\, l_{I\,II} \quad (0 \leq \lambda \leq 1),$$

Fig. 118. Es soll untersucht werden, wie die Berechnung auf Ausgleich

den auf Verteilung berechneten Querschnitt q_v des Leiters $I\,II$ beeinflussen würde, falls J allein sich ändert.

Nach Gleichung (XXI) und (XXII) [63] berechnet sich der Querschnitt q_v zu

$$q_v = (1 - \lambda)\,\lambda J \frac{l\varrho}{\varepsilon} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (169)$$

Betrachten wir λ als Veränderliche, so sehen wir, dass q_v um so kleiner und damit um so mehr der Nachrechnung auf Ausgleich bedürftig wird, je mehr J an I oder II heranrückt. Für $\lambda = 0$ und $\lambda = 1$ erhalten wir den vorher betrachteten Fall der ausschliesslichen Belastung in den Speisepunkten und es wird $q_v = 0$. Der Leiter ist dann ausschliesslich auf Ausgleich zu berechnen (Gleichung XXX). Sein Maximum erreicht q_v für $\lambda = 0{\cdot}5$, wenn also J in der Mitte der Strecke liegt, und dann ist die Wahrscheinlichkeit am geringsten, dass die Berechnung auf Ausgleich eine Querschnittsvergrösserung zur Folge haben könnte. Ferner beeinflusst J den Querschnitt der Speisekabel I und II im Verhältnis zu den Teilströmen $(1 - \lambda)\,J$ und λJ, und zwar um so bedeutender, je grösser diese im Verhältnis zu dem Rest der von I und II geführten Speiseströme sind. Drücken wir demnach, um w_I und w_{II} von J abhängig zu machen, J_I und J_{II} in Teilen von J aus, schreiben wir also

$$J_I = n\,(1 - \lambda)\,J; \quad J_{II} = m\,\lambda J,$$

so wird

$$w_I = \frac{\varepsilon_s}{n\,(1 - \lambda)\,J}; \quad w_{II} = \frac{\varepsilon_s}{m\,\lambda J}$$

also

$$w_I + w_{II} = \frac{(m - n)\,\lambda + n}{m n\,(1 - \lambda)\,\lambda} \cdot \frac{\varepsilon_s}{J}.$$

Hieraus ersehen wir, dass $w_I + w_{II}$ abhängig von λ, m und n ein Minimum wird, wenn $m = n$ und $\lambda = 0{\cdot}5$ ist; wir leiten daraus die Forderung ab, dass die Speisepunkte nicht an Orten starken Verbrauchs, sondern möglichst im Schwerpunkt benachbarter grosser Verbraucher anzuordnen sind, damit die benachbarten Speiseleitungen eine Belastung erhalten, die umgekehrt proportional ist zur Entfernung von den letzteren. Am günstigsten, in Übereinstimmung mit dem vorigen Ergebnis, wonach q_v für $\lambda = 0{\cdot}5$ am wenigsten einer Verstärkung infolge Ausgleichs bedurfte, ist es, wenn die Speisepunkte so gelegt werden, dass starke Verbrauchsstellen in der Mitte zwischen ihnen liegen.

Nehmen wir nun an, dass das Netz dieser Bedingung gemäss dimensioniert ist, so dass also $m = n$, so vereinfacht sich der oben erhaltene Ausdruck zu

$$w_I + w_{II} = \frac{p_s}{n\,(1 - \lambda)\,\lambda} \cdot \frac{\mathcal{E}}{J} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (170)$$

wenn wir zugleich $\varepsilon_s = p_s\,\mathcal{E}$ einführen. Daher wird nach Gleichung (XXX), wenn q_a den auf Ausgleich berechneten Querschnitt bezeichnet:

$$q_a = \left(a_{I\,II} - \frac{1}{p_s}\right) n\,(1 - \lambda)\,\lambda\, l_{I\,II}\,\varrho \frac{J}{\mathcal{E}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (171)$$

und folglich, wenn in Gleichung (169) ε durch $p_v\,\mathcal{E}$ ausgedrückt wird:

$$\frac{q_a}{q_v} = \left(a_{I\,II} - \frac{1}{p_s}\right) n\,p_v \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (172)$$

Für $q_a = q_v$ wird der Ausgleich

$$a_{I\,II} = \frac{1}{n\,p_v} + \frac{1}{p_s} \quad \ldots \ldots \quad (173)$$

Also die Notwendigkeit, auf Ausgleich nachzurechnen, wird um so grösser, je grösser n und p_v, d. h. je mehr im Verhältnis zur Gesamtbelastung die einzelne der Veränderung unterworfene Belastung ins Gewicht fällt und je grösser der Spannungsverlust im Verteilungskabel bei voller Belastung gewählt wurde. Ebenso übersteigt $\frac{q_a}{q_v}$ um so leichter die Einheit, je grösser der Spannungsverlust in den Speisekabeln und je grösser der verlangte Ausgleich ist. Für $a_{I\,II} = \frac{1}{p_s}$ wird $\frac{q_a}{q_v} = 0$, d. h. selbst bei fehlender Ausgleichsleitung ($q_a = 0$) würde bei einem Speisekabelverlust $p_s \leq \frac{1}{a_{I\,II}}$ eine Nachrechnung auf Ausgleich sich erübrigen, da eben die Spannungsschwankung infolge der möglichen Belastungsschwankung kleiner als der zugelassene Potentialunterschied $\varepsilon_{I\,II}$ bleibt. Ist z. B. eine grösste Belastungsschwankung von 20 % vorausgesetzt — $u_I = 0{\cdot}20$ — bei einem maximal zulässigen Potentialunterschied von einem Prozent der Nutzspannung — $\varepsilon_{I\,II} = 0{\cdot}01\,\mathcal{E}$ —, so wird nach Gleichung (168) $a_{I\,II} = 20$ und der Speiseleiterverlust darf $p_s = \frac{1}{20} = 0{\cdot}05$, also 5 % von $\mathcal{E}$ betragen, ohne dass $\varepsilon_{I\,II}$ seinen Grenzwert überschreitet.

Ebenso wird ferner $a_{I\,II} = \frac{1}{p_s}$ und die Nachrechnung auf Ausgleich ist unnötig, wenn n sehr gross, der Belastungsstrom J im Verhältnis zu den Speiseleitungsströmen also sehr klein wird: **Eine Ausgleichsrechnung braucht nur für grosse Verbrauchsstellen durchgeführt zu werden.**

Bemerkenswert ist auch, dass unter den angenommenen Verhältnissen, nämlich dass die Speiseleitungsströme umgekehrt proportional zu den Entfernungen der betrachteten Belastung von den Speisepunkten sind, die Lage der Belastung keinen Einfluss auf den Ausgleich ausübt; denn Gleichung (172) ist von λ unabhängig. Trifft diese Annahme dagegen nicht zu, etwa weil trotz relativer Bedeutung von J die Speisepunkte I und II unmittelbar mit starken Stromabnahmen belastet sind oder, was auf dasselbe hinauskommt, die von I und II ausgehenden übrigen, nicht der Betrachtung unterworfenen Leiter starke Ströme führen, so müssen wir die Bedingungsgleichungen

$$J_I = n\,(1-\lambda)\,J; \quad J_{II} = n\,\lambda\,J$$

ändern. Setzen wir etwa

$$J_I = J_{II} = \frac{n}{2}\,J,$$

indem wir voraussetzen, dass die Speisepunkte so gelegt sind, dass die Speiseleitungen ungefähr gleiche Ströme führen, was in der Praxis gern angestrebt wird, so erhalten wir anstatt der Gleichungen (170) bis (173):

$$w_I + w_{II} = \frac{4\,p_s}{n}\,\frac{\mathcal{E}}{J} \quad \ldots \ldots \quad (170\,a)$$

$$q_a = \left(a_{I\,II} - \frac{1}{p_s}\right)\frac{n}{4}\,l_{I\,II}\,\varrho\,\frac{J}{\mathcal{E}} \quad \ldots \quad (171\,a)$$

$$\frac{q_a}{q_v} = \left(a_{I\,II} - \frac{1}{p_s}\right)\frac{n\,p_v}{4\,(1-\lambda)\,\lambda} \quad \ldots \quad (172\,a)$$

$$a_{I\,II} = \frac{4\,(1-\lambda)\,\lambda}{n\,p_v} + \frac{1}{p_s} \quad \ldots \ldots \quad (173\,a)$$

Die Formeln (170) bis (173) gehen für $\lambda = 0{\cdot}5$ in die letzten vier Gleichungen über, können also mit ihnen unmittelbar verglichen werden. Dies ist der Grund, weswegen der Proportionalitätsfaktor $\frac{n}{2}$ bei der Bedingungsgleichung für J_I und J_{II} eingeführt wurde.

Die aus den Gleichungen (170) bis (173) gezogenen Schlüsse bezüglich der Notwendigkeit der Ausgleichsrechnung, die auch für die letzten Gleichungen gelten, müssen nun noch durch die Diskussion der Lage der Belastung J vervollständigt werden. Ist J unmittelbar von I oder II abgezweigt, $\lambda = 0$ oder $= 1$, so wird, wenn etwa wegen anderer geringerer oder nicht berücksichtigter Belastungen eine Verbindung $I\,II$ besteht, der Ausgleich $a_{I\,II}$ am kleinsten, nämlich gleich $\frac{1}{p_{\bullet}}$; daher ist die Notwendigkeit, auf Ausgleich nachzurechnen und gegebenen Falls die Verteilungsleitung zu verstärken, am grössten. Der Ausgleich wird, wie früher, am grössten, wenn $\lambda = 0{\cdot}5$.

Gehen wir nun dazu über, J wirklich um uJ kleiner werden zu lassen, so müssen wir zunächst die Grössen $a_{I\,II}$ und $\bar{\varepsilon}_{I\,II}$ neu bestimmen, da ihre Definition nach Gleichung (167) und (166) hier nicht mehr unmittelbar anwendbar ist. Zu diesem Zwecke haben wir, um die neuen Belastungen der Speisepunkte I und II festzustellen, anstatt J die Grösse $\eta J = (1 - u) J$ äquipotentiell auf diese zu übertragen und erhalten daher:

$$\eta_I\, J_I = J_I - J\,(1-\lambda) + \eta J\,(1-\lambda) = J_I - J u\,(1-\lambda)$$
$$\eta_{II} J_{II} = J_{II} - J\lambda + \eta J \lambda = J_{II} - J u \lambda.$$

Durch Änderung der Belastung J werden also stets beide Speisepunkte in Mitleidenschaft gezogen, indem beider Belastung vermindert wird. Es folgt also:

$$u_I = \eta_{II} - \eta_I = \frac{J}{J_I}\, u\,(1-\lambda) - \frac{J}{J_{II}}\, u\lambda = uJ\left(\frac{1-\lambda}{J_I} - \frac{\lambda}{J_{II}}\right)$$

und

$$\Delta J_I = u_I\, J_I = uJ\,[1 - \lambda\,(1 + f_{II\,I})],$$

da nach der früheren Bezeichnung

$$\frac{J_I}{J_{II}} = \frac{w_{II}}{w_I} = f_{II\,I}$$

ist, und ferner

$$\varepsilon_{I\,II} = \Delta J_I\, w_I = uJw_I\ \ [1 - \lambda\,(1 + f_{II\,I})] = u\,(J)_I\, w_I \quad . \quad (174)$$

wenn

$$(J)_I = J\,[1 - \lambda\,(1 + f_{II\,I})] \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (175)$$

gesetzt wird. $u\,(J)_I$ ist also, wie früher [**96**] ΔJ_I, als derjenige Strom aufzufassen, der, das Speisekabel I von I nach Z durchströmend, die Spannungserhöhung $\bar{\varepsilon}_{I\,II}$ hervorbringt.

Für

$$f_{II\,I} > \frac{1-\lambda}{\lambda}, \quad \text{also } \lambda > \frac{1}{1 + f_{II\,I}}$$

wird $(J)_I$ negativ, d. h. $\varepsilon_{I\,II}$ und damit $J_{I\,II}$ wird negativ, der Ausgleichsstrom fliesst von II nach I. Man hat in diesem Falle den Ausgleich des Punktes II zu betrachten und kann daher schreiben:

$$-\varepsilon_{III} = \overline{\varepsilon}_{III} = u\,(J)_{II}\,w_{II} \quad \ldots\ldots \quad (174\,a)$$

$$(J)_{II} = J\,[\lambda - (1-\lambda)\,f_{III}] \quad \ldots\ldots \quad (175\,a)$$

wenn

$$f_{III} = \frac{w_I}{w_{II}}.$$

Hierin ist, wie unmittelbar folgt, für $f_{III} > \frac{1-\lambda}{\lambda}$

$$f_{III} < \frac{\lambda}{1-\lambda},$$

also $(J)_{II}$ und damit $\overline{\varepsilon}_{III}$ bezw. J_{III} positiv.

Für

$$\lambda = \frac{1}{1+f_{III}}$$

wird $(J)_I = 0$, also auch $\overline{\varepsilon}_{III} = 0$, d. h. wenn die Speiseleitungswiderstände w_I und w_{II} sich verhalten, wie die Widerstände der anliegenden Teilstrecken λw_{III} und $(1-\lambda)\,w_{III}$ der Verteilungsleitung, so kann überhaupt keine Potentialdifferenz zwischen den Speisepunkten I und II auftreten, wie sehr sich auch die Belastung J ändert. Dieses Verhältnis der Widerstände wird in den folgenden beiden Fällen vorhanden sein: erstens wenn J die einzige bezw. die bei weitem überwiegende Belastung des betrachteten Netzteils ist, und zweitens wenn die ausser J vorhandenen Belastungen der Speisepunkte sich zu einander verhalten wie $\frac{\lambda}{1-\lambda}$. Dasselbe ist der Fall, wenn bei beliebigem f_{III} die (einzige) der Veränderung unterworfene Belastung in der Entfernung

$$\lambda\,l_{III} = \frac{1}{1+f_{III}}\,l_{III}$$

vom Speisepunkte I liegt.

Die Gleichung (174) ist nun mit der Gleichung (166) identisch und definiert daher die Grösse $\overline{\varepsilon}_{III}$, wenn an Stelle von u_I der der Änderung von J entsprechende Faktor u und an Stelle von J_I der nach Gleichung (175) in bezug auf I reduzierte Belastungsstrom $(J)_I$ tritt. Sie geht für $\lambda = 0$ (und $\lambda = 1$) in die Gleichung (166) über und schliesst daher den vorher behandelten Fall der ausschliesslich an den Speisepunkten angreifenden Belastungen ein. Schreiben wir in Anlehnung an Gleichung (166):

$$\overline{\varepsilon}_{III} = u\,p_s\,\frac{(J)_I}{J_I}\,\mathcal{E},$$

so erhalten wir

$$\frac{\overline{\varepsilon}_{III}}{\varepsilon_{III}} = \frac{u}{p}\,\frac{(J)_I}{J_I}\,p_s = a_{III}\,p_s \quad \ldots\ldots \quad (167\,a)$$

wo jetzt

$$a_{III} = \frac{u}{p}\,\frac{(J)_I}{J_I} \quad \ldots\ldots \quad (168\,a)$$

die Definitionsgleichung für den Ausgleich des Speisepunktes I gegen II ist. Setzen wir ferner

$$a_{III} = a\,\frac{(J)_I}{J_I},$$

also
$$a = a_{III} \frac{J_I}{(J)_I} = \frac{u}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (176)$$

so bedeutet a diejenige prozentuale Verminderung, die J erfahren muss, damit die Spannungsschwankung ε_{III} gleich 0·01 $\mathcal{E}$ wird.

An die Stelle der Gleichungen (XXIX) treten also jetzt die Gleichungen:

$$p = \frac{u}{a} = \frac{u}{a_{III}} \frac{(J)_I}{J_I}; \quad \varepsilon_{III} = p\,\mathcal{E} = \frac{u}{a_{III}} \frac{(J)_I}{J_I}\,\mathcal{E} \quad . \quad \text{(XXIX a)}$$

Die übrigen Hauptgleichungen für die Ausgleichsberechnung, nämlich die Gleichungen (XXVIII), (XXX) und (XXXI) bleiben unverändert bestehen, da ja die in ihnen vorkommenden Grössen bis auf a_{III} von der Last J unabhängig sind, a_{III} aber eine den neuen Verhältnissen entsprechende Bedeutung durch Gleichung (168 a) erhalten hat.

Für den eben behandelten Fall, dass nur eine Belastung der Änderung unterliegt, können wir auch die Bedingung aufstellen, der der Ausgleichsstrom genügen muss, damit der Spannungsverlust an der Abzweigungsstelle keinen grösseren Wert annimmt, als für volle Belastung berechnet war. Der Spannungsverlust ε bei voller Belastung ist

$$\varepsilon = \lambda\,(1 - \lambda)\,w_{III}\,J,$$

dagegen, nachdem J um uJ vermindert worden, nach Gleichung (116) [68]:

$$\varepsilon' = \lambda\,w_{III}\,[J_{III} + \eta\,(1 - \lambda)\,J].$$

Soll also $\varepsilon' \leqq \varepsilon$ sein, so muss

$$J_{III} + \eta\,(1 - \lambda)\,J < (1 - \lambda)\,J,$$

d. h.

$$J_{III} = \frac{\varepsilon_{III}}{w_{III}} \leqq (1 - \lambda)\,u\,J$$

sein. Für

$$u = 0{\cdot}4, \; \lambda = 0{\cdot}5$$

z. B. darf der Ausgleichsstrom den Wert

$$J_{III} = 0{\cdot}2\,J$$

nicht überschreiten. Für die gegebenen Verhältnisse ist weiterhin

$$\varepsilon = 0{\cdot}25\,J w_{III},$$

also wird

$$\varepsilon_{III} = J_{III}\,w_{III} = 0{\cdot}8\,\varepsilon,$$

d. h. wenn ε z. B. 2 % von $\mathcal{E}$ beträgt, so darf ε_{III} 1·6 % betragen, es ist also:

$$p = 0{\cdot}016 \quad \text{und} \quad a = \frac{0{\cdot}4}{0{\cdot}016} = 25.$$

Es würde also in diesem Falle ein Ausgleich $a = 25$ bezogen auf J genügen.

Für $\lambda = 0{\cdot}2$ dagegen würde sich ergeben:

$$J_{III} = 0{\cdot}32\ J; \quad \varepsilon = 0{\cdot}16\ w_{III}\ J; \quad \varepsilon_{III} = 2\ \varepsilon = 0{\cdot}04\ \mathcal{E}; \quad a = 10.$$

98. Ausgleich bei gleichmässig verteilter Belastung.

Mit dem Fall der Einzelbelastung J ist zugleich der Fall der gleichmässig verteilten Belastung von der Gesamtgrösse J' erledigt, da ja diese sich durch eine einzige Belastung von der Grösse $J = \frac{1}{2} J'$ in der Mitte des Leiters III und zwei an I und II angreifenden Belastungen $\frac{J'}{4}$ ersetzen lässt [**64**]. Da in diesem Falle der auf Verteilung berechnete Leiterquerschnitt halb so gross wird, als wenn der Strom J' in seiner vollen Grösse in der Mitte der Leitung abgezweigt würde, so ist die Notwendigkeit auf Ausgleich nachzurechnen bei gleichmässig verteilter Belastung entsprechend grösser.

99. Ausgleich bei mehreren von der Verteilungsleitung abgezweigten Belastungen.

Sind mehrere Einzellasten J_ν, die um $u_\nu\, J_\nu$ kleiner werden können, zu berücksichtigen, wobei die Belastungen der Speisepunkte selbst durch die Grenzwerte 0 und 1 für λ eingeschlossen sind, so wird in ähnlicher Weise:

$$\left.\begin{aligned} \Delta J_I &= \Sigma u_\nu\, (J_\nu)_I \\ (J_\nu)_I &= J_\nu\,[1 - \lambda_\nu\,(1 + f_{III})] \\ \bar{\varepsilon}_{III} &= p_s\, \mathcal{E}\, \Sigma u_\nu\, \frac{(J_\nu)_I}{J_I} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad (175\,\mathrm{b})$$

Daher tritt an die Stelle der Gleichung (168 a) die Gleichung:

$$a_{III} = \Sigma \frac{u_\nu}{p}\, \frac{(J_\nu)_I}{J_I} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (168\,\mathrm{b})$$

und an die Stelle der Gleichungen (XXIX a) die folgenden:

$$p = \frac{\Sigma u_\nu\, (J_\nu)_I}{a_{III}\, J_I}; \quad \varepsilon_{III} = \frac{\Sigma u_\nu\, (J_\nu)_I}{a_{III}\, J_I} \cdot \mathcal{E} \quad \ldots \quad (\mathrm{XXIX\,b})$$

während die Gleichungen (XXVIII), (XXX) und (XXXI) bestehen bleiben.

Auch hier können wir die Grösse $a_\nu = \frac{u_\nu}{p}$ einführen, die angiebt, um wieviel Prozent die betrachteten Belastungen J_ν zugleich verkleinert werden müssen, damit der Potentialunterschied ε_{III} 1 % der Nutzspannung betrage. Wird $u_\nu = u =$ constans, so erhalten wir:

$$a = \frac{u}{p} = a_{III}\, \frac{J_I}{\Sigma (J_\nu)_I} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (176\,\mathrm{b})$$

Aus den Gleichungen (175 b) geht hervor, dass die $(J_\nu)_I$ sowohl positive als negative Werte annehmen können, und zwar wird

$$(J_\nu)_I \gtrless 0, \text{ wenn } \lambda_\nu \lessgtr \frac{1}{1 + f_{III}}.$$

Die negativen $(J_\nu)_I$ werden, wie leicht ersichtlich, positiv, wenn man f_{III} anstatt f_{III} einführt, d. h. wenn man anstatt der Ausgleichsgrössen ε_{III} und a_{III}

des Punktes I diejenigen von II, also ε_{III} und a_{III} betrachtet. Die durch

$$\lambda_v = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

bestimmten Punkte bilden die Grenze zwischen den beiden zu I und II gehörigen Gebieten, die, jedes für sich einer Belastungsänderung unterworfen, ε_{III} bezw. ε_{III} zu einem Maximum machen. Gleichzeitige Änderungen in beiden Gebieten heben sich zum Teil (oder auch ganz) auf, analog dem Falle der allein belasteten Speisepunkte [96], deren Ausgleich ebenfalls nur von der Differenz der Belastungsänderungen beider Stromabnahmen abhing.

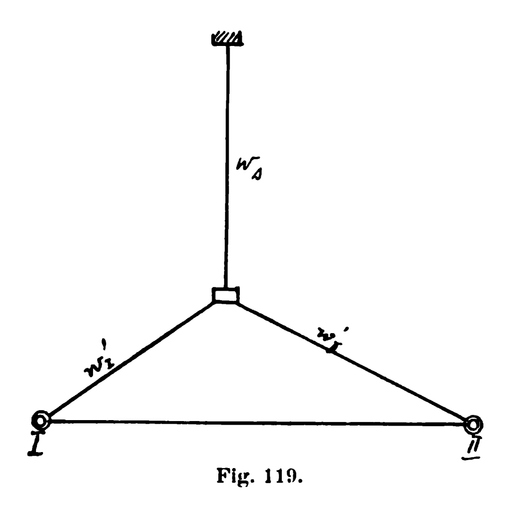


Fig. 119.

Wollen wir also den ungünstigsten Fall betrachten, so dürfen wir nur die Belastungen eines durch die Bedingung

$$\lambda = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

bestimmten Gebietes ändern, während alle anderen Gebiete in voller Stärke wirken.

Wie aus der Betrachtung des Falles der allein belasteten Speisepunkte folgt, tritt stets ein grösserer als der für volle Belastung berechnete Spannungsabfall in der Verteilungsleitung auf, wenn bei voll belasteten Abzweigungen sich die Belastung eines Speisepunktes allein vermindert, da ja zu dem berechneten Spannungsverlust noch der durch den Ausgleichsstrom J_{III} verursachte Spannungsabfall sich addiert. In diesem Falle ist stets der Querschnitt der Verteilungsleitung auf Ausgleich zu berechnen.

100. Einfluss von Sammelleitungen auf den Ausgleich.

Sind die beiden Speiseleitungen zum Teil zu einer Sammelleitung zusammengefasst (Fig. 119), so treten in der Gleichung (XXVIII) an die Stelle der Widerstände w_I und w_{II} die kleineren Widerstände w_I' und w_{II}' und an die Stelle von $p_s \mathcal{E}$ der entsprechend kleinere Teilverlust $p_s' \mathcal{E}$. Eine solche Anordnung verbessert den Ausgleich unter sonst gleichen Netzverhältnissen wesentlich, wie man aus folgender Überlegung erkennt.

Gemäss seiner Entstehung kann der Widerstand w_s in zwei getrennte Leiter, w_{sI} und w_{sII}, gespalten werden, die den Bedingungen genügen:

$$g_{sI} + g_{sII} = g_s$$
$$\frac{g_{sI}}{g_{sII}} = \frac{J_I}{J_{II}}.$$

Die so entstandenen getrennten Speiseleiter haben daher die Widerstände $w_I = w_{sI} + w_I'$ und $w_{II} = w_{sII} + w_{II}'$ und der Ausgleich für diesen Fall wird a_{III} gemäss Gleichung (XXVIII). Dagegen wird für die Anordnung nach Fig. 119, falls wir

$$w_{sI} = \lambda w_I, \quad w_{sII} = \lambda w_{II},$$

also

$$w_I' = (1 - \lambda)\, w_I, \quad w_{II}' = (1 - \lambda)\, w_{II}, \quad p_s' = (1 - \lambda)\, p_s$$

einführen, der Ausgleich

$$a_{III}' = \frac{w_I' + w_{II}' + w_{III}}{w_{III}} \cdot \frac{1}{(1 - \lambda)\, p_s} = \left(\frac{w_I + w_{II}}{w_{III}} + \frac{1}{1 - \lambda}\right) \cdot \frac{1}{p_s},$$

so dass

$$a_{III}' - a_{III} = \frac{\lambda}{1 - \lambda} \cdot \frac{1}{p_s} > 0.$$

a_{III}' ist also stets grösser als a_{III}. Z. B. für $\lambda = 0{\cdot}8$; $p_s = 0{\cdot}1$; $a_{III} = 40$ wird $a_{III}' = 80$, also doppelt so gross, als wenn kein Sammelleiter vorhanden wäre.

Daher ist die Vereinigung von Speiseleitern zu Sammelleitungen zu empfehlen, besonders da auch die Gestehungs- und Verlegungskosten eines dickeren Leiters geringer sind, als die zweier dünnerer. Ein Nachteil haftet den Sammelleitungen allerdings an, nämlich dass bei einer Störung in ihm ein grösseres Netzgebiet in Mitleidenschaft gezogen wird [123].

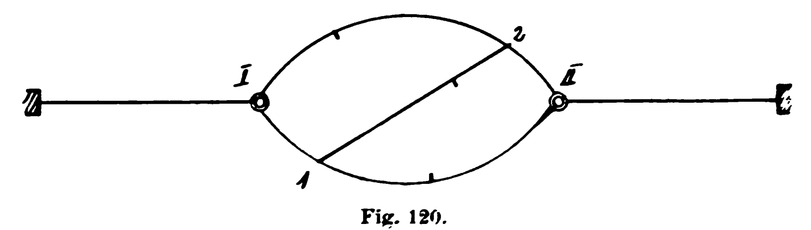


Fig. 120.

101. Der Ausgleich in verzweigten Netzen

Liegen zwischen den beiden betrachteten Speisepunkten mehrere Verteilungsleiter, die ihrerseits wieder durch belastete Verteilungsleiter verbunden sind, d. h. bildet das Verteilungsnetz Maschen (Fig. 120), so können wir zwar noch immer die Ausgleichsgrösse a_{III} nach Gleichung (XXVIII) bilden, etwa indem wir die Maschen durch widerstandstreue Netzumbildung (88 ff.) in einen einfachen Strang *III* auflösen,[1] doch würde dieses Verfahren, das bei mehreren Speisepunkten für alle Kombinationen von je zwei Punkten zu wiederholen wäre, eine ausserordentliche Erschwerung der Ausgleichsrechnungen bedeuten, da, wie wir gesehen haben, die Methode der Netzumbildung langwierige und zeitraubende Rechnungen bedingt. In einzelnen einfachen Fällen wird man sich dadurch helfen können, dass man die Verbindung 1 2 vernachlässigt. Allgemein ist dies jedenfalls nicht angängig, da

1) Vorschlag von GALLUSSER und HAUSMANN: Elektrische Leitungsnetze. Berlin 1904.

des Punktes I diejenigen von II, also ε_{III} und a_{III} betrachtet. Die durch

$$\lambda_{v} = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

bestimmten Punkte bilden die Grenze zwischen den beiden zu I und II gehörigen Gebieten, die, jedes für sich einer Belastungsänderung unterworfen, ε_{III} bezw. ε_{III} zu einem Maximum machen. Gleichzeitige Änderungen in beiden Gebieten heben sich zum Teil (oder auch ganz) auf, analog dem Falle der allein belasteten Speisepunkte [**96**], deren Ausgleich ebenfalls nur von der Differenz der Belastungsänderungen beider Stromabnahmen abhing.

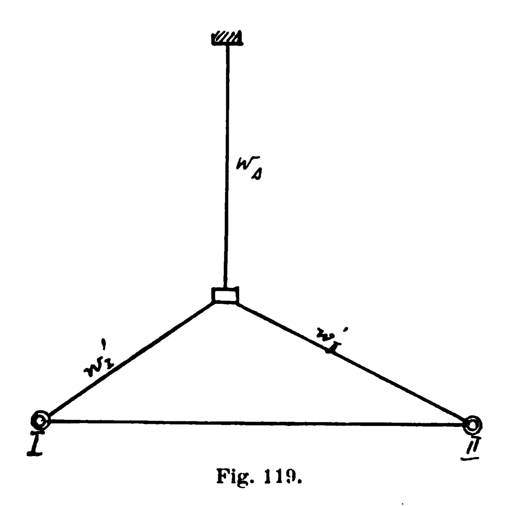


Fig. 119.

Wollen wir also den ungünstigsten Fall betrachten, so dürfen wir nur die Belastungen eines durch die Bedingung

$$\lambda = \frac{1}{1 + f_{III}}$$

bestimmten Gebietes ändern, während alle anderen Gebiete in voller Stärke wirken.

Wie aus der Betrachtung des Falles der allein belasteten Speisepunkte folgt, tritt stets ein grösserer als der für volle Belastung berechnete Spannungsabfall in der Verteilungsleitung auf, wenn bei voll belasteten Abzweigungen sich die Belastung eines Speisepunktes allein vermindert, da ja zu dem berechneten Spannungsverlust noch der durch den Ausgleichsstrom J_{III} verursachte Spannungsabfall sich addiert. In diesem Falle ist stets der Querschnitt der Verteilungsleitung auf Ausgleich zu berechnen.

100. Einfluss von Sammelleitungen auf den Ausgleich.

Sind die beiden Speiseleitungen zum Teil zu einer Sammelleitung zusammengefasst (Fig. 119), so treten in der Gleichung (XXVIII) an die Stelle der Widerstände w_I und w_{II} die kleineren Widerstände w_I' und w_{II}' und an die Stelle von $p_s \mathfrak{E}$ der entsprechend kleinere Teilverlust $p_s' \mathfrak{E}$. Eine solche Anordnung verbessert den Ausgleich unter sonst gleichen Netzverhältnissen wesentlich, wie man aus folgender Überlegung erkennt.

Gemäss seiner Entstehung kann der Widerstand w_s in zwei getrennte Leiter, w_{sI} und w_{sII}, gespalten werden, die den Bedingungen genügen:

$$g_{sI} + g_{sII} = g_s$$
$$\frac{g_{sI}}{g_{sII}} = \frac{J_I}{J_{II}}.$$

Die so entstandenen getrennten Speiseleiter haben daher die Widerstände $w_I = w_{sI} + w_I'$ und $w_{II} = w_{sII} + w_{II}'$ und der Ausgleich für diesen Fall wird a_{III} gemäss Gleichung (XXVIII). Dagegen wird für die Anordnung nach Fig. 119, falls wir

$$w_{sI} = \lambda w_I, \quad w_{sII} = \lambda w_{II},$$

also

$$w_I' = (1 - \lambda)\, w_I, \quad w_{II}' = (1 - \lambda)\, w_{II}, \quad p_s' = (1 - \lambda)\, p_s$$

einführen, der Ausgleich

$$a_{III}' = \frac{w_I' + w_{II}' + w_{III}}{w_{III}} \cdot \frac{1}{(1-\lambda)\, p_s} = \left(\frac{w_I + w_{II}}{w_{III}} + \frac{1}{1-\lambda}\right) \cdot \frac{1}{p_s},$$

so dass

$$a_{III}' - a_{III} = \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot \frac{1}{p_s} > 0.$$

a_{III}' ist also stets grösser als a_{III}. Z. B. für $\lambda = 0{\cdot}8$; $p_s = 0{\cdot}1$; $a_{III} = 40$ wird $a_{III}' = 80$, also doppelt so gross, als wenn kein Sammelleiter vorhanden wäre.

Daher ist die Vereinigung von Speiseleitern zu Sammelleitungen zu empfehlen, besonders da auch die Gestehungs- und Verlegungskosten eines dickeren Leiters geringer sind, als die zweier dünnerer. Ein Nachteil haftet den Sammelleitungen allerdings an, nämlich dass bei einer Störung in ihm ein grösseres Netzgebiet in Mitleidenschaft gezogen wird [123].

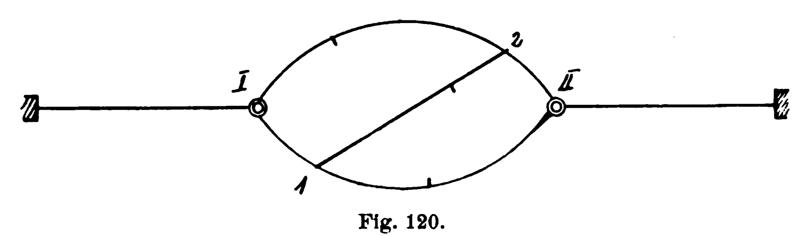


Fig. 120.

101. Der Ausgleich in verzweigten Netzen.

Liegen zwischen den beiden betrachteten Speisepunkten mehrere Verteilungsleiter, die ihrerseits wieder durch belastete Verteilungsleiter verbunden sind, d. h. bildet das Verteilungsnetz Maschen (Fig. 120), so können wir zwar noch immer die Ausgleichsgrösse a_{III} nach Gleichung (XXVIII) bilden, etwa indem wir die Maschen durch widerstandstreue Netzumbildung [88 ff.] in einen einfachen Strang III auflösen,[1]) doch würde dieses Verfahren, das bei mehreren Speisepunkten für alle Kombinationen von je zwei Punkten zu wiederholen wäre, eine ausserordentliche Erschwerung der Ausgleichsrechnungen bedeuten, da, wie wir gesehen haben, die Methode der Netzumbildung langwierige und zeitraubende Rechnungen bedingt. In einzelnen einfachen Fällen wird man sich dadurch helfen können, dass man die Verbindung 1 2 vernachlässigt. Allgemein ist dies jedenfalls nicht angängig, da

1) Vorschlag von GALLUSSER und HAUSMANN: Elektrische Leitungsnetze. Berlin 1904.

es ja ganz von der Leitfähigkeit g_{12} und der Potentialdifferenz ε_{12} der Enden des Leiters 12 abhängt, wieviel er zum Ausgleich beiträgt.

Aber selbst wenn man a_{III} auf diesem Wege berechnet hat, so kann man doch nicht mit seiner Hilfe auf die eigentlich wichtige, das Ziel der Ausgleichsrechnungen bildende Grösse ε_{III} vermittelst der Gleichung (XXIX b) und (175 b) zurückgehen, weil diese die Grösse λ enthalten, die hier keine Bedeutung mehr hat, da ja die Einzellasten nicht unmittelbar auf die Speisepunkte, sondern nur auf die Knotenpunkte übertragen werden können, die weitere Übertragung der Knotenpunktslasten auf die Speisepunkte aber die Aufstellung und Lösung der Netzgleichungen notwendig macht. Wir beschreiten diesen Weg und werden dadurch die allgemeine Lösung des Problems des Ausgleichs von mehreren Seiten bei verzweigten Verteilungsleitungen erhalten.

Betrachten wir ein Netz mit N Speisepunkten und n Knotenpunkten, das nur in den Kreuzungspunkten belastet ist, so haben wir, wie bereits gezeigt, auch die Speisepunkte als Knotenpunkte zu behandeln, falls wir, wie stets bei Ausgleichsrechnungen, eine andere als die normale Belastung voraussetzen. Die Netzgleichungen lauten dann:

$$\left.\begin{array}{l}
g_{II}\,\varepsilon_I - g_{I\,II}\,\varepsilon_{II} - \cdots - g_{IN}\,\varepsilon_N - g_{I1}\,\varepsilon_1 - g_{I2}\,\varepsilon_2 - \cdots - g_{In}\,\varepsilon_n = J_I \\
-g_{II\,I}\,\varepsilon_I + g_{II\,II}\,\varepsilon_{II} - \cdots - g_{II\,N}\,\varepsilon_N - g_{II\,1}\,\varepsilon_1 - g_{II\,2}\,\varepsilon_2 - \cdots - g_{II\,n}\,\varepsilon_n = J_{II} \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
-g_{NI}\,\varepsilon_I - g_{N\,II}\,\varepsilon_{II} - \cdots + g_{NN}\,\varepsilon_N - g_{N1}\,\varepsilon_1 - g_{N2}\,\varepsilon_2 - \cdots - g_{Nn}\,\varepsilon_n = J_N \\
-g_{1I}\,\varepsilon_I - g_{1\,II}\,\varepsilon_{II} - \cdots - g_{1N}\,\varepsilon_N + g_{11}\,\varepsilon_1 - g_{12}\,\varepsilon_2 - \cdots - g_{1n}\,\varepsilon_n = J_1 \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
-g_{nI}\,\varepsilon_I - g_{n\,II}\,\varepsilon_{II} - \cdots - g_{nN}\,\varepsilon_N - g_{n1}\,\varepsilon_1 - g_{n2}\,\varepsilon_2 - \cdots + g_{nn}\,\varepsilon_n = J_n
\end{array}\right\} \quad (177$$

Die Lösung schreiben wir nun in der bereits bekannten Form:

$$\left.\begin{array}{l}
\varepsilon_I = \varrho_{II}\,J_I + \varrho_{I\,II}\,J_{II} + \cdots + \varrho_{IN}\,J_N + \varrho_{I1}\,J_1 + \cdots + \varrho_{In}\,J_n \\
\varepsilon_{II} = \varrho_{II\,I}\,J_I + \varrho_{II\,II}\,J_{II} + \cdots + \varrho_{II\,N}\,J_N + \varrho_{II\,1}\,J_1 + \cdots + \varrho_{II\,n}\,J_n \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\varepsilon_N = \varrho_{NI}\,J_I + \varrho_{N\,II}\,J_{II} + \cdots + \varrho_{NN}\,J_N + \varrho_{N1}\,J_1 + \cdots + \varrho_{Nn}\,J_n \\
\varepsilon_1 = \varrho_{1I}\,J_I + \varrho_{1\,II}\,J_{II} + \cdots + \varrho_{1N}\,J_N + \varrho_{11}\,J_1 + \cdots + \varrho_{1n}\,J_n \\
\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\varepsilon_n = \varrho_{n1}\,J_I + \varrho_{n\,II}\,J_{II} + \cdots + \varrho_{nN}\,J_N + \varrho_{n1}\,J_1 + \cdots + \varrho_{nn}\,J_n
\end{array}\right\} \quad (178)$$

worin die $\varrho_{\mu\nu}$ die im Abschnitt [**83**] definierte Bedeutung von Knotenpunktsspannungsverlusten besitzen. Sie können nach der VERHOECKXschen Methode oder vermittelst des GAUSSschen Näherungsverfahrens [**82**] berechnet werden, indem man jeweilig nur einen Knotenpunkt mit der Stromeinheit belastet. Wie wir aber aus den zu entwickelnden Formeln noch sehen werden, kommen für die Ausgleichsrechnungen nur die von den Speisepunkten abhängigen Grössen ϱ_{NM} bezw. ϱ_{Nn} in Frage, es brauchen für unseren Zweck also auch nur diese berechnet zu werden. Dies sichert aber dem GAUSSschen Verfahren sowohl in bezug auf Kürze als Bequemlichkeit der Rechnungen

unbedingt den Vorzug, denn es sind verhältnismässig wenige Gleichungssysteme zu lösen, nämlich nur so viele, als Speisepunkte vorhanden sind. Von dem VERHOECKXschen Verfahren dagegen wissen wir, dass die endgültigen ϱ-Werte erst nach Einführung sämtlicher Knotenpunkte erhalten werden, es wären also alle ϱ-Werte zu ermitteln.

Für die normale (volle) Netzbelastung ist

$$\varepsilon_I = \varepsilon_{II} = \cdots = \varepsilon_N = \varepsilon_s,$$

also wird

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{III} = \varepsilon_{II} - \varepsilon_I = (\varrho_{III} - \varrho_{II})\, J_I + (\varrho_{III\,I} - \varrho_{III})\, J_{II} + \cdots \\ + (\varrho_{II\nu} - \varrho_{I\nu})\, J_\nu + \cdots = 0\end{aligned}\right\} \quad (179)$$

und allgemein

$$\begin{aligned}\varepsilon_{NM} = (\varrho_{MI} - \varrho_{NI})\, J_I + (\varrho_{MII} - \varrho_{NII})\, J_{II} + \cdots \\ + (\varrho_{M\nu} - \varrho_{N\nu})\, J_\nu + \cdots = 0.\end{aligned}$$

102. Änderung nur einer Knotenpunktsbelastung.

Nehmen wir nun an, dass zunächst nur die Belastung eines Punktes, etwa J_I, um $u_I J_I = (1 - \eta_I)\, J_I$ vermindert wird, so erhalten wir für die neue Spannungsverteilung ein Gleichungssystem, das sich von (178) nur dadurch unterscheidet, dass $\eta_I J_I$ an die Stelle von J_I tritt. Daher wird nunmehr:

$$\varepsilon_{III} = (\varrho_{III} - \varrho_{II})\, \eta_I J_I + (\varrho_{III\,I} - \varrho_{III})\, J_{II} + \cdots + (\varrho_{II\nu} - \varrho_{I\nu})\, J_\nu + \cdots$$

und durch Subtraktion der Gleichung (179) von dieser Gleichung:

$$\varepsilon_{III} = -(\varrho_{III} - \varrho_{II})\, (1 - \eta_I)\, J_I = (\varrho_{II} - \varrho_{III})\, u_I\, J_I.$$

Allgemein ist also der Potentialunterschied von I gegen einen anderen Speisepunkt N:

$$\varepsilon_{IN} = (\varrho_{II} - \varrho_{NI})\, u_I\, J_I \quad \ldots\ldots \quad (180)$$

Man kann sich ε_{IN} auch dadurch entstanden denken, dass der Knotenpunkt I, anstatt um $u_I J_I$ entlastet zu werden, mit der negativen Grösse $- u_I J_I$ belastet wird, während im übrigen alle der Vollbelastung des Netzes entsprechenden Stromabnahmen, also auch J_I, wirken. Dann überlagert sich der normalen Spannungsverteilung eine solche, die der Belastung $- u_I J_I$ entspricht, nämlich im Punkte N ein Spannungsverlust $- \varrho_{NI} u_I J_I$ und in I ein Spannungsverlust $- \varrho_{II} u_I J_I$. Die thatsächlichen Spannungsverluste bei N und I sind also:

$$\begin{aligned}\varepsilon_N &= \varepsilon_s - \varrho_{NI}\, u_I\, J_I \\ \varepsilon_I &= \varepsilon_s - \varrho_{II}\, u_I\, J_I,\end{aligned}$$

mithin wie vorher:

$$\varepsilon_{IN} = (\varrho_{II} - \varrho_{NI})\, u_I\, J_I.$$

Denken wir uns nun den Speisepunkt I vom übrigen Netz getrennt (etwa durch Schneiden der Verteilungskabel rings um I), so würde der der Belastungsverminderung entsprechende Strom $\Delta J_I = u_I J_I$ von I nach Z

fliessend wieder eine Spannungserhöhung von I gegenüber allen anderen unverändert gebliebenen Speisepunkten hervorrufen:

$$\bar{\varepsilon}_{IN} = \Delta J_I w_I = u_I \frac{J_I}{J_{0I}} \varepsilon_s, \quad \ldots \ldots \quad (181)$$

die infolge der Verteilungs- bezw. Ausgleichsleitungen einen Ausgleichsstrom hervorruft, der die Potentialdifferenz $\bar{\varepsilon}_{IN}$ auf den thatsächlich vorhandenen Unterschied ε_{IN} herabdrückt. Es wird also:

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{IN}}{\varepsilon_{IN}} = \frac{u_I}{p_{IN}} \frac{J_I}{J_{0I}} p_s = a_{IN}\, p_s \quad \ldots \ldots \quad (182)$$

und

$$a_{IN} = \frac{u_I}{p_{IN}} \frac{J_I}{J_{0I}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (168\text{c})$$

Setzen wir hierin für p_{IN} seinen Wert, nämlich

$$p_{IN} = \frac{\varepsilon_{IN}}{\varepsilon} = (\varrho_{II} - \varrho_{NI})\, u_I\, J_I \frac{p_s}{\varepsilon},$$

so folgt

$$a_{IN} = \frac{1}{\varrho_{II} - \varrho_{NI}} \cdot \frac{\varepsilon_s}{p_s\, J_{0I}}.$$

Nun ist

$$\varepsilon_s = w_I\, J_{0I},$$

also tritt an die Stelle der bei einfacher Strecke $I\,II$ geltenden Gleichung (XXVIII) die folgende Gleichung, wenn wir zugleich allgemein die Belastungsänderung $u_n J_n$ des n^{ten} Knotenpunktes in bezug auf den N^{ten} und M^{ten} Speisepunkt einführen:

$$a_{NM} = \frac{w_N}{\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}} \cdot \frac{1}{p_s} \quad (n = N, 1, 2 \cdots) \quad . \quad . \quad (\text{XXVIII c})$$

Diese Gleichung geht in (XXVIII) über, wenn für

$$\varrho_{Nn} = \varrho_{II} \text{ und } \varrho_{Mn} = \varrho_{III}$$

die entsprechenden Werte eingesetzt werden. Es ist nämlich gemäss Fig. 115 (Seite 161):

$$\varrho_{II} = \frac{g_{IIII}}{g_{II}\, g_{IIII} - g_{III}^2}; \quad \varrho_{III} = \frac{g_{III}}{g_{II}\, g_{IIII} - g_{III}^2},$$

also:

$$\varrho_{II} - \varrho_{III} = \frac{g_{IIII} - g_{III}}{g_{II}\, g_{IIII} - g_{III}^2}.$$

Nun ist

$$g_{IIII} - g_{III} = g_{II} \quad \text{und} \quad g_{II}\, g_{IIII} - g_{III}^2 = g_I\, g_{II} + g_{III}\,(g_I + g_{II}).$$

Setzt man an Stelle der Leitfähigkeiten die Widerstände, so folgt nach einigen einfachen Umformungen:

$$a_{III} = \frac{w_I + w_{II} + w_{III}}{w_{III}} \cdot \frac{1}{p_s}.$$

An die Stelle der Gleichung (XXIX) ferner treten hier die folgenden:

$$\left.\begin{aligned} p_{NM} &= \frac{u_n}{a_{NM}} \cdot \frac{J_n}{J_{0N}} = (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn})\, u_n\, J_n\, \frac{p_s}{\varepsilon_s} \\ \varepsilon_{NM} &= p_{NM}\, \mathcal{E} = (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn})\, u_n\, J_n \\ (n &= N, 1, 2 \cdots) \end{aligned}\right\} \quad . \quad \text{(XXIX c)}$$

Was nun die Gleichungen (XXX) und (XXXI) betrifft, die wir für den einfachen Strang zur Querschnittsberechnung auf Ausgleich aufgestellt haben, so müssen wir hier wieder die beiden Fälle der Projektierung und der Betriebskontrolle unterscheiden. Bei der Projektierung eines Netzes hat die Ausgleichsrechnung den Zweck, festzustellen, ob die auf Verteilung berechneten Querschnitte für den Ausgleich genügen. Stellt es sich heraus, dass dies nicht der Fall ist, so wird man natürlich nicht — abgesehen von Ausnahmefällen — unbelastete Ausgleichsleiter zwischen den einzelnen Speisepunkten verlegen, sondern die vorhandenen Verteilungsleiter verstärken, da dies billiger und für etwaige spätere Erhöhung der Stromentnahmen vorteilhafter ist. Es hat daher keinen Sinn, einen Querschnitt q_{NM} oder die entsprechende Leitfähigkeit g_{NM} zu berechnen, da ja nicht einfache Verbindungen, sondern Maschen zwischen den Speisepunkten liegen.

Dass in diesem Falle ε_{NM} am wirksamsten verkleinert wird, wenn diejenigen Leitfähigkeiten sämtlich oder teilweise vergrössert werden, die in dem der Belastungsänderung unterworfenen Punkte, hier also in N zusammenlaufen, lässt sich zwar ohne weiteres einsehen, kann aber auch auf folgendem Wege gezeigt werden. Geben wir der Übersichtlichkeit wegen N und M wieder die Werte I und II, so folgt, dass

$$\varepsilon_{III} = (\varrho_{II} - \varrho_{III})\, u_I\, J_I$$

kleiner wird, entweder durch Vergrösserung von ϱ_{III} oder durch Verkleinerung von ϱ_{II} oder durch beides. Nun ist [83]:

$$\varrho_{II} = \frac{D_{II}}{D}; \quad \varrho_{III} = \frac{D_{III}}{D},$$

d. h.

$$\left.\begin{aligned} \varrho_{II} &= \frac{1}{D}\left[g_{IIII}\, D'_{IIII} - g_{IIIII}\, D'_{IIIII} - \cdots - g_{II1}\, D'_{II1} - g_{II2}\, D'_{II2} - \cdots\right] \\ \varrho_{III} &= \frac{1}{D}\left[g_{III}\, D'_{IIII} + g_{IIII}\, D'_{IIIII} + \cdots + g_{I1}\, D'_{II1} + g_{I2}\, D'_{II2} + \cdots\right] \end{aligned}\right\} \quad (183)$$

worin $D'_{\mu\nu}$ die Unterdeterminanten der Unterdeterminante D_{II} bezeichnen. Die Richtigkeit dieser Gleichungen erkennt man leicht, wenn man die Unterdeterminanten D_{II} und D_{III} nach $g_{II\nu}$ bezw. $g_{I\nu}$ entwickelt. Nun enthalten die Grössen $D'_{\mu\nu}$ überhaupt nicht die Leitfähigkeiten $g_{I\nu}$, also wird ϱ_{II} durch Vergrösserung der $g_{I\nu}$ verkleinert, da ja die Determinante D dadurch vergrössert wird. Zugleich aber wird ϱ_{III} vergrössert, da das $g_{I\nu}$ jedes einzelnen Gliedes verhältnismässig schneller wächst als D, also $\frac{g_{I\nu}}{D}$ mit $g_{I\nu}$ grösser wird.

Man wird also, falls eine Querschnittsvergrösserung der Leiter eines Speisepunktes nötig ist, für einen oder mehrere der von diesem Speisepunkt ausgehenden Verteilungsleiter — der Speiseleiter kommt im allgemeinen

fliessend wieder eine Spannungserhöhung von I gegenüber allen anderen unverändert gebliebenen Speisepunkten hervorrufen:

$$\bar{\varepsilon}_{IN} = \Delta J_I w_I = u_I \frac{J_I}{J_{0I}} \varepsilon_s, \quad \ldots \ldots \quad (181)$$

die infolge der Verteilungs- bezw. Ausgleichsleitungen einen Ausgleichsstrom hervorruft, der die Potentialdifferenz $\bar{\varepsilon}_{IN}$ auf den thatsächlich vorhandenen Unterschied ε_{IN} herabdrückt. Es wird also:

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{IN}}{\varepsilon_{IN}} = \frac{u_I}{p_{IN}} \frac{J_I}{J_{0I}} p_s = a_{IN} p_s \quad \ldots \ldots \quad (182)$$

und

$$a_{IN} = \frac{u_I}{p_{IN}} \frac{J_I}{J_{0I}} \quad \ldots \ldots \quad (168c)$$

Setzen wir hierin für p_{IN} seinen Wert, nämlich

$$p_{IN} = \frac{\varepsilon_{IN}}{\varepsilon} = (\varrho_{II} - \varrho_{NI}) u_I J_I \frac{p_s}{\varepsilon},$$

so folgt

$$a_{IN} = \frac{1}{\varrho_{II} - \varrho_{NI}} \cdot \frac{\varepsilon_s}{p_s J_{0I}}.$$

Nun ist

$$\varepsilon_s = w_I J_{0I},$$

also tritt an die Stelle der bei einfacher Strecke $I\,II$ geltenden Gleichung (XXVIII) die folgende Gleichung, wenn wir zugleich allgemein die Belastungsänderung $u_n J_n$ des n^{ten} Knotenpunktes in bezug auf den N^{ten} und M^{ten} Speisepunkt einführen:

$$a_{NM} = \frac{w_N}{\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}} \cdot \frac{1}{p_s} \quad (n = N, 1, 2 \cdots) \quad . \quad . \quad (\text{XXVIII c})$$

Diese Gleichung geht in (XXVIII) über, wenn für

$$\varrho_{Nn} = \varrho_{II} \text{ und } \varrho_{Mn} = \varrho_{III}$$

die entsprechenden Werte eingesetzt werden. Es ist nämlich gemäss Fig. 115 (Seite 161):

$$\varrho_{II} = \frac{g_{IIII}}{g_{II} g_{IIII} - g_{III}^2}; \quad \varrho_{III} = \frac{g_{III}}{g_{II} g_{IIII} - g_{III}^2},$$

also:

$$\varrho_{II} - \varrho_{III} = \frac{g_{IIII} - g_{III}}{g_{II} g_{IIII} - g_{III}^2}.$$

Nun ist

$$g_{IIII} - g_{III} = g_{II} \quad \text{und} \quad g_{II} g_{IIII} - g_{III}^2 = g_I g_{II} + g_{III} (g_I + g_{II}).$$

Setzt man an Stelle der Leitfähigkeiten die Widerstände, so folgt nach einigen einfachen Umformungen:

$$a_{III} = \frac{w_I + w_{II} + w_{III}}{w_{III}} \cdot \frac{1}{p_s}.$$

An die Stelle der Gleichung (XXIX) ferner treten hier die folgenden:

$$\left.\begin{aligned} p_{NM} &= \frac{u_n}{a_{NM}} \cdot \frac{J_n}{J_{0N}} = (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn})\, u_n\, J_n\, \frac{p_n}{\varepsilon_n} \\ \varepsilon_{NM} &= p_{NM}\, \mathcal{E} = (\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn})\, u_n\, J_n \\ (n &= N, 1, 2 \cdots) \end{aligned}\right\} \quad . \quad \text{(XXIX c)}$$

Was nun die Gleichungen (XXX) und (XXXI) betrifft, die wir für den einfachen Strang zur Querschnittsberechnung auf Ausgleich aufgestellt haben, so müssen wir hier wieder die beiden Fälle der Projektierung und der Betriebskontrolle unterscheiden. Bei der Projektierung eines Netzes hat die Ausgleichsrechnung den Zweck, festzustellen, ob die auf Verteilung berechneten Querschnitte für den Ausgleich genügen. Stellt es sich heraus, dass dies nicht der Fall ist, so wird man natürlich nicht — abgesehen von Ausnahmefällen — unbelastete Ausgleichsleiter zwischen den einzelnen Speisepunkten verlegen, sondern die vorhandenen Verteilungsleiter verstärken, da dies billiger und für etwaige spätere Erhöhung der Stromentnahmen vorteilhafter ist. Es hat daher keinen Sinn, einen Querschnitt q_{NM} oder die entsprechende Leitfähigkeit g_{NM} zu berechnen, da ja nicht einfache Verbindungen, sondern Maschen zwischen den Speisepunkten liegen.

Dass in diesem Falle ε_{NM} am wirksamsten verkleinert wird, wenn diejenigen Leitfähigkeiten sämtlich oder teilweise vergrössert werden, die in dem der Belastungsänderung unterworfenen Punkte, hier also in N zusammenlaufen, lässt sich zwar ohne weiteres einsehen, kann aber auch auf folgendem Wege gezeigt werden. Geben wir der Übersichtlichkeit wegen N und M wieder die Werte I und II, so folgt, dass

$$\varepsilon_{III} = (\varrho_{II} - \varrho_{III})\, u_I\, J_I$$

kleiner wird, entweder durch Vergrösserung von ϱ_{III} oder durch Verkleinerung von ϱ_{II} oder durch beides. Nun ist [83]:

$$\varrho_{II} = \frac{D_{II}}{D}; \quad \varrho_{III} = \frac{D_{III}}{D},$$

d. h.

$$\left.\begin{aligned} \varrho_{II} &= \frac{1}{D}\left[g_{IIII}\, D'_{IIII} - g_{IIIII}\, D'_{IIIII} - \cdots - g_{II1}\, D'_{II1} - g_{II2}\, D'_{II2} - \cdots\right] \\ \varrho_{III} &= \frac{1}{D}\left[g_{III}\, D'_{IIII} + g_{IIII}\, D'_{IIIII} + \cdots + g_{I1}\, D'_{II1} + g_{I2}\, D'_{II2} + \cdots\right] \end{aligned}\right\} \quad (183)$$

worin $D'_{\mu\nu}$ die Unterdeterminanten der Unterdeterminante D_{II} bezeichnen. Die Richtigkeit dieser Gleichungen erkennt man leicht, wenn man die Unterdeterminanten D_{II} und D_{III} nach $g_{II\nu}$ bezw. $g_{I\nu}$ entwickelt. Nun enthalten die Grössen $D'_{\mu\nu}$ überhaupt nicht die Leitfähigkeiten $g_{I\nu}$, also wird ϱ_{II} durch Vergrösserung der $g_{I\nu}$ verkleinert, da ja die Determinante D dadurch vergrössert wird. Zugleich aber wird ϱ_{III} vergrössert, da das $g_{I\nu}$ jedes einzelnen Gliedes verhältnismässig schneller wächst als D, also $\frac{g_{I\nu}}{D}$ mit $g_{I\nu}$ grösser wird.

Man wird also, falls eine Querschnittsvergrösserung der Leiter eines Speisepunktes nötig ist, für einen oder mehrere der von diesem Speisepunkt ausgehenden Verteilungsleiter — der Speiseleiter kommt im allgemeinen

nicht in Frage, weil ja zugleich mit dem seinen der Querschnitt aller anderen Speiseleiter vergrössert werden müsste — den nächstgrösseren Normalquerschnitt wählen und durch nochmalige Berechnung der Grössen ϱ kontrollieren, ob der Spannungsunterschied auf die zulässige Grösse herabgegangen ist.

Anders liegen dagegen die Verhältnisse, wenn bei fertig verlegten, in Betrieb befindlichen Netzen Ausgleichsberechnungen oder unmittelbare Messungen einen unzulässig hohen Potentialunterschied ε_{III} bezw. eine zu geringe Ausgleichsgrösse a_{III} ergeben. Dann wird in der Regel eine unmittelbare Verbindung der beiden Speisepunkte durch einen Ausgleichsleiter hergestellt, dessen Querschnitt wir nunmehr berechnen wollen.

Der vorhandene Ausgleich sei nach (XXVIIIc) zu a_{III} berechnet; er soll durch Verlegung einer Ausgleichsleitung von der Leitfähigkeit g'_{III} auf die Grösse a'_{III}, bezw. ε_{III} auf den Wert ε'_{III} gebracht werden.

Durch Verlegung der Leitfähigkeit g'_{III} werden in der Determinante D des Gleichungssystems die drei Grössen g_{II}, g_{III} und g_{IIII} geändert und wir erhalten als neue Determinante

$$D' = \begin{vmatrix} (g_{II} + g'_{III}) & -(g_{III} + g'_{III}) & -g_{IIII} & \cdots \\ -(g_{III} + g'_{III}) & (g_{IIII} + g'_{III}) & -g_{IIIII} & \cdots \\ -g_{IIII} & -g_{IIIII} & g_{IIIIII} & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix}$$

$$= D + \begin{vmatrix} g'_{III} & -g_{III} & -g_{IIII} & \cdots \\ -g'_{III} & g_{IIII} & -g_{IIIII} & \cdots \\ 0 & -g_{IIIII} & g_{IIIIII} & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} g_{II} & -g'_{III} & -g_{IIII} & \cdots \\ -g_{III} & g'_{III} & -g_{IIIII} & \cdots \\ -g_{IIII} & 0 & g_{IIIIII} & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix}$$

$$+ \begin{vmatrix} g'_{III} & -g'_{III} & -g_{IIII} & \cdots \\ -g'_{III} & g'_{III} & -g_{IIIII} & \cdots \\ 0 & 0 & g_{IIIIII} & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix}$$

oder, da die letzte Determinante wegen der Gleichheit der ersten und zweiten Säule Null ergiebt:

$$D' = D + g'_{III} D_{II} - g'_{III} D_{III} - g'_{III} D_{III} + g'_{III} D_{IIII},$$

d. h.

$$\frac{D'}{D} = 1 + g'_{III}(\varrho_{II} - 2\varrho_{III} + \varrho_{IIII}) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (184)$$

Ferner wird infolge der gleichen Entwickelung, aus der die Gleichungen (183) entstanden sind:

$$\varrho'_{II} = \frac{1}{D'}\left[(g_{IIII} + g'_{III}) D'_{IIII} - g_{IIIII} D'_{IIIII} - \cdots\right]$$

$$\varrho'_{III} = \frac{1}{D'}\left[(g_{III} + g'_{III}) D'_{IIII} + g_{IIII} D'_{IIIII} + \cdots\right],$$

da ja die Grössen $D'_{\mu\nu}$ von der Grösse g'_{III} unabhängig sind. Daher wird:

$$\varrho'_{II} - \varrho'_{III} = \frac{1}{D'}\left[(g_{IIII} - g_{III}) D'_{IIII} - (g_{IIIII} + g_{IIII}) D'_{IIIII} - \cdots\right],$$

während aus den Gleichungen (183) folgt:

$$\varrho_{II} - \varrho_{III} = \frac{1}{D}\left[(g_{III} - g_{II})\, D'_{III} - (g_{IIII} + g_{III})\, D'_{IIII} - \cdots\right],$$

also erhalten wir unter Berücksichtigung der Gleichung (XXIX c):

$$\frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon'_{III}} = \frac{\varrho_{II} - \varrho_{III}}{\varrho'_{II} - \varrho'_{III}} = \frac{D'}{D} = 1 + g'_{III}\,(\varrho_{II} - 2\varrho_{III} + \varrho_{IIII}).$$

Andererseits ergiebt die Gleichung (XXVIII c):

$$\frac{\varrho_{II} - \varrho_{III}}{\varrho'_{II} - \varrho'_{III}} = \frac{a'_{III}}{a_{III}},$$

also folgt:

$$g'_{III} = \frac{\varDelta \varepsilon_{III}}{\varepsilon'_{III}} \cdot \frac{1}{\varrho_{II} - 2\varrho_{III} + \varrho_{IIII}} = \frac{\varDelta a_{III}}{a_{III}} \cdot \frac{1}{\varrho_{II} - 2\varrho_{III} + \varrho_{IIII}} \qquad \text{(XXXI c)}$$

wenn

$$\varDelta \varepsilon_{III} = \varepsilon_{III} - \varepsilon'_{III}$$

$$\varDelta a_{III} = a'_{III} - a_{III}$$

gesetzt wird. Die Gleichung (XXXI c) können wir nach Elimination von a_{III} mittels Gleichung (XXVIII c) in Übereinstimmung mit (XXXI) auch in der folgenden Form schreiben:

$$g'_{III} = \frac{\varDelta a_{III}\, p_e}{w_I} \cdot \frac{\varrho_{II} - \varrho_{III}}{\varrho_{II} - 2\varrho_{III} + \varrho_{IIII}} \quad . \quad . \quad . \quad \text{(XXXI' c)}$$

Für den Sonderfall der Fig. 115 (S. 161) geht diese Gleichung wieder in die Gleichung (XXXI) über, da

$$\varrho_{II} = \frac{g_{II} + g_{III}}{D}; \quad \varrho_{III} = \frac{g_{III}}{D}; \quad \varrho_{IIII} = \frac{g_I + g_{III}}{D},$$

also

$$g'_{III} = \frac{\varDelta a_{III}\, p_e}{w_I} \cdot \frac{g_{II}}{g_I + g_{II}} = \frac{\varDelta a_{III}\, p_e}{w_I + w_{II}}.$$

103. Änderung mehrerer Knotenpunktsbelastungen.

Nehmen an der Belastungsänderung ausser dem Speisepunkte I mehrere Knotenpunkte n teil, so tritt an die Stelle der Gleichung (180) die folgende Gleichung:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{IN} = (\varrho_{II} - \varrho_{NI})\, u_I J_I + (\varrho_{I1} - \varrho_{N1})\, u_1 J_1 + \cdots \\ + (\varrho_{In} - \varrho_{Nn})\, u_n J_n + \cdots \end{aligned}\right\} \quad . \quad (185)$$

Für die Grösse ϱ_{NN} folgt aus ihrer Bedeutung als Spannungsverlust in dem allein belasteten Speisepunkt N ohne weiteres, dass sie grösser ist als jedes andere ϱ_{NM}. Dagegen hängt es ganz von der Lage der Knotenpunkte ab, ob einer der Spannungsverluste ϱ_{Nn} grösser oder kleiner ist als ein anderer ϱ_{Mn}. Daher würden einige der Glieder der Gleichung (185) positiv, andere negativ werden, wenn alle Knotenpunkte für die Belastungsänderung in Betracht gezogen würden. Ein Maximum wird ε_{IN} natürlich für die Summe aller positiven ϱ-Differenzen, und diese definieren daher den Bezirk von I,

der bei der Ausgleichsrechnung für gleichzeitige Änderungen zu berücksichtigen ist. Für diesen Bezirk geht dann die Gleichung (181) über in

$$\overline{\varepsilon}_{IN} = \Sigma u_n \frac{J_n}{J_{0I}} \varepsilon_s \quad \ldots \ldots \ldots \quad (186)$$

und die Gleichungen (XXVIII c) und (XXIX c) erhalten die Form:

$$a_{NM} = \frac{w_N \Sigma u_n J_n}{\Sigma(\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n} \cdot \frac{1}{p_s} \quad \ldots \ldots \quad (\text{XXVIII d})$$

$$\left.\begin{aligned} p_{NM} &= \frac{\Sigma u_n J_n}{a_{NM} J_{0N}} = \Sigma(\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n \cdot \frac{p_s}{\varepsilon_s} \\ \varepsilon_{NM} &= p_{NM} \mathcal{E} = \Sigma(\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}) u_n J_n \end{aligned}\right\} \quad (\text{XXIX d})$$

wo

$$n = N, 1, 2 \cdots \quad \text{und} \quad \varrho_{Nn} > \varrho_{Mn}.$$

Die Gleichungen (XXXI c) und (XXXI′c) bleiben auch hier bestehen, da sie bis auf die durch die letzten beiden Gleichungen definierten Grössen a_{NM} und ε_{NM} von der Belastungsänderung der übrigen Punkte nicht beeinflusst werden. Ihre allgemeine Form lautet:

$$g'_{NM} = \frac{\varDelta \varepsilon_{NM}}{\varepsilon'_{NM}} \cdot \frac{1}{\varrho_{NN} - 2\varrho_{NM} + \varrho_{MM}} = \frac{\varDelta a_{NM}}{a_{NM}} \cdot \frac{1}{\varrho_{NN} - 2\varrho_{NM} + \varrho_{MM}} \quad (\text{XXXI d})$$

$$g'_{NM} = \frac{\varDelta a_{NM} p_s}{w_N} \cdot \frac{\varrho_{NN} - \varrho_{MN}}{\varrho_{NN} - 2\varrho_{NM} + \varrho_{MM}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (\text{XXXI′d})$$

wobei

$$\varDelta \varepsilon_{NM} = \varepsilon_{NM} - \varepsilon'_{NM}$$
$$\varDelta a_{NM} = a'_{NM} - a_{NM}.$$

104. Änderung einer Belastung zwischen zwei Knotenpunkten.

Soll der Einfluss der Belastungsänderung $u_\nu i_\nu$ für eine Stromabnahme i_ν untersucht werden, die zwischen den beiden Knotenpunkten n und m liegt — einer derselben kann auch ein Speisepunkt sein —, so können die folgenden beiden Fälle eintreten: Beide Knotenpunkte liegen innerhalb eines der durch die positiven ϱ-Differenzen [103] definierten Speisepunktsbezirke, sagen wir innerhalb des Bezirkes I, oder sie liegen in verschiedenen Bezirken I und II.

Im ersten Falle wird, wenn wir das Verhältnis $\frac{l_{n\nu}}{l_{nm}}$ (Fig. 121) mit λ_{nm} bezeichnen:

$$u_n J_n = (1 - \lambda_{nm}) u_\nu i_\nu$$
$$u_m J_m = \lambda_{nm} u_\nu i_\nu.$$

Also wird aus Gleichung (XXIX d):

$$\varepsilon_{III} = [(\varrho_{In} - \varrho_{IIn})(1 - \lambda_{nm}) + (\varrho_{Im} - \varrho_{IIm}) \lambda_{nm}] u_\nu i_\nu, \quad (187)$$

worin

$$\varrho_{In} > \varrho_{IIn} \quad \text{und} \quad \varrho_{Im} > \varrho_{IIm}.$$

Setzen wir entsprechend der früheren, bei dem einfachen Verteilungsleiter III benutzten Bezeichnung [97]:

$$\frac{\varrho_{IIm} - \varrho_{Im}}{\varrho_{In} - \varrho_{IIn}} = f_{mn},$$

bezw. wenn allgemein anstatt I und II die beiden Speisepunkte N und M in Frage kommen (siehe Fig. 121):

$$\frac{\varrho_{Mm} - \varrho_{Nm}}{\varrho_{Nn} - \varrho_{Mn}} = f_{mn} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (188)$$

und ferner

$$u_\nu\, i_\nu\, [1 - \lambda_{nm}\, (1 + f_{mn})] = u_n\, (i_\nu)_n, \quad \ldots \ldots \quad (189)$$

so ist $u_n\, (i_\nu)_n$ stets positiv, da infolge

$$\varrho_{Im} > \varrho_{IIm}$$

der Faktor f_{mn} negativ, also

$$\lambda_{nm}\, (1 + f_{mn}) < 1$$

ist. Die Gleichung (187) vereinfacht sich also zu:

$$\varepsilon_{III} = (\varrho_{In} - \varrho_{IIn})\, u_n\, (i_\nu)_n \ldots \ldots \ldots \quad (190)$$

Diese Gleichung ist mit (XXIX c) identisch, wenn wir anstatt $u_n\, J_n$ die auf den Knotenpunkt n reduzierte „wirksame Belastungsänderung“ $u_n\, (i_\nu)_n$ einführen;

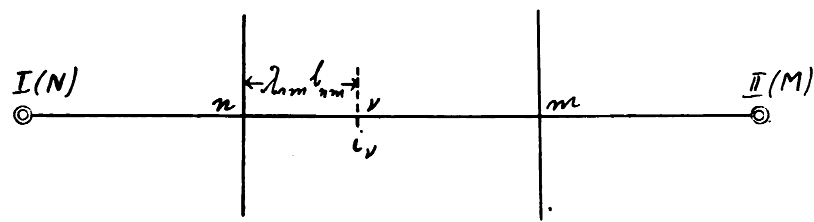


Fig. 121.

d. h. aber, um den Einfluss einer zwischen zwei zum Bezirk I gehörigen Knotenpunkten liegenden Belastungsänderung $u_\nu\, i_\nu$ auf den Ausgleich gegen einen Speisepunkt II kennen zu lernen, haben wir sie nach Gleichung (189) reduziert als im Knotenpunkt n wirkend zu betrachten, also sie auf diesen Knotenpunkt zu übertragen, und können dann unmittelbar die Gleichungen (XXVIII c) bis (XXXI c) anwenden. Die Grösse f_{mn} ist natürlich für jede Kombination zweier Speisepunkte N und M besonders zu bilden.

Im zweiten Falle, wenn die einzige zu untersuchende Belastung zwischen zwei Knotenpunkten liegt, die verschiedenen Bezirken I und II angehören, so bleiben die eben entwickelten Gleichungen (187) bis (190) bestehen, nur wird dann, wenn n der zu I (allgemein zu N) und m der zu II (allgemein zu M) gehörende Knotenpunkt ist,

$$\varrho_{Im} < \varrho_{IIm},$$

f_{mn} wird also positiv. Nun kann aber nach Gleichung (189) $u_n\, (i_\nu)_n$ und damit ε_{III} und a_{III} negativ werden, nämlich dann, wenn

$$\lambda_{nm} > \frac{1}{1 + f_{mn}}$$

ist. In diesem Falle wäre anstatt des Ausgleichs des Bezirkes I derjenige von II zu berechnen.

Wird

$$\lambda_{nm} = \frac{1}{1 + f_{mn}},$$

so übt die Änderung der Stromabnahme überhaupt keinen Einfluss auf ε_{III} aus, da sich jetzt aus der Gleichung (189) stets

$$u_n (i_\nu)_n = 0$$

und folglich

$$\varepsilon_{III} = 0$$

ergiebt. Wir können also die im vorigen Abschnitt definierten Bezirke der einzelnen Speisepunkte erweitern, indem wir ihre Grenzen durch diejenigen Punkte der zu zwei benachbarten Bezirken gehörenden Verteilungsleiter gehen lassen, für welche

$$\lambda_{nm} = \frac{1}{1 + f_{mn}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (191)$$

ist. Jede innerhalb dieser Bezirke liegende Belastungsänderung wirkt nur auf den Speisepunkt des betreffenden Bezirks, und zwar mit demjenigen im Knotenpunkt n wirkenden Betrage $u_n (i_\nu)_n$, der durch die Gleichungen (189) und (188) definiert ist. Für die Ausgleichsgrössen gelten die Gleichungen (XXVIII c) bis (XXXI c).

105. Änderung beliebiger Belastungen. Sind schliesslich beliebig viele Belastungsänderungen $u_\nu\, i_\nu$ eines Bezirks zugleich wirksam, so erhält die Gleichung (187) die Form:

$$\varepsilon_{III} = \Sigma \left[(\varrho_{In} - \varrho_{IIn}) (1 - \lambda_{nm}) + (\varrho_{Im} - \varrho_{IIm}) \lambda_{nm} \right] u_\nu\, i_\nu \quad (192)$$

und zwar sind hierin sowohl die ν als auch die n und m Veränderliche, von denen die ν alle innerhalb des Bezirks I (allgemein N) vorkommenden, die n und m auch in den angrenzenden Bezirken liegende Werte annehmen können, wobei n und m die benachbarten Knotenpunkte der in Frage kommenden Belastung i_ν bedeuten. Die Gleichung (188) bleibt bestehen und an die Stelle der Gleichung (189) tritt die folgende:

$$u_n\, J_n = \Sigma\, u_\nu\, i_\nu \left[1 - \lambda_{nm} (1 + f_{mn}) \right] = \Sigma u_\nu\, (i_\nu)_n. \quad . \quad . \quad (193)$$

f_{mn} wird negativ, wenn beide Knotenpunkte innerhalb, positiv, wenn einer derselben ausserhalb des untersuchten Bezirks liegt. Für alle i_ν aber ist die wirksame auf den Knotenpunkt n übertragene Belastungsänderung $u_n (i_\nu)_n$ positiv.

Wie wir also bei der Netzberechnung „auf Verteilung“ die Einzellasten äquipotentiell auf die Knotenpunkte verlegen und dadurch ein nur in den letzteren belastetes Netz erhalten, für welches uns die Netzgleichungen die Spannungs- und Stromverteilung liefern, so müssen wir bei der Netzberechnung „auf Ausgleich“ die Belastungsänderungen als „wirksame Belastungsänderungen“ auf die entsprechenden Knotenpunkte nach Gleichung (189) übertragen und erhalten so ein Netz, in dem nur gewisse Knotenpunkte eines Bezirks Belastungsänderungen unterliegen. Für dieses aber gelten die in dem Abschnitt [**103**] entwickelten Gleichungen (XXVIII d) bis (XXXI d), die

uns die Ausgleichsgrössen und für gegebene Änderungen dieser die Leitfähigkeiten bezw. Querschnitte der Ausgleichsleiter geben.

Hiermit ist das Problem der Ausgleichsberechnung eines verzweigten Netzes in seiner allgemeinsten Form gelöst.

106. Grösse der Werte ε_{NM}, p_{NM} und u.

Was nun die Grösse der maximalen Potentialdifferenz zwischen zwei benachbarten Speisepunkten anlangt, so kann naturgemäss ein einheitlicher Wert dafür nicht angegeben werden. Massgebend auch für ε_{NM} ist die Forderung, dass die grösste Spannungsschwankung an keiner Stelle des Netzes und zu keiner Zeit denjenigen Wert überschreiten darf, der eine merkbare Störung der empfindlichsten Stromverbraucher, der Glühlampen, hervorrufen würde, und dafür hatten wir im Abschnitt [5] die Grösse $\pm 3\,\%$ der Nutzspannung gefunden. Der ungünstigste, aber auch unwahrscheinlichste Fall war nun [99] der, dass sich nur die unmittelbare Belastung eines Speisepunktes ändert, während die Verteilungsleitung die der Berechnung zu Grunde gelegte maximale Belastung zu befriedigen hat. In diesem Falle ist stets der maximale Spannungsverlust grösser als der berechnete, und man wird daher, wie bereits hervorgehoben, die Verlegung eines Speisepunktes an den Ort einer starken Einzellast zu vermeiden suchen. Ist dies nicht angängig, so hat man diesem Umstand dadurch Rechnung zu tragen, dass die angrenzenden Verteilungsleitungen nicht unter Zugrundelegung des maximalen, sondern des um die Grösse ε_{NM} kleineren Spannungsverlustes berechnet werden. Andererseits haben wir bei dem günstigen Falle einer Einzellast, die zwischen den Speisepunkten liegt (vgl. das Beispiel des Abschnitts [97] Seite 172), gesehen, dass die Grösse $\varepsilon_{I\,II}$ den Wert des maximalen Spannungsverlustes erreichen und sogar überschreiten konnte, da eben infolge der Entlastung auch der Verlust in der Leitung geringer wird, und das Potential des anliegenden Speisepunktes infolge der Regulierung um die halbe Differenz $\varepsilon_{I\,II}$ steigt.

Das Letztere jedoch ist in Netzen mit mehreren Speiseleitern nicht mehr der Fall, da die mittlere Netzspannung bei der Belastungsänderung nur eines Speisepunktbezirks wesentlich gleich der normalen Spannung sein wird. In praktischen Netzen wird daher keinesfalls ε_{NM} den Wert ε_{max} überschreiten oder auch nur erreichen dürfen. Im allgemeinen wird ε_{NM} um so grösser angenommen werden können, je mehr durch die Entlastung der Spannungsverlust in der Verteilungsleitung vermindert wird, d. h. je dünner die Netzbelastung ist (im allgemeinen also je kleiner das Netz ist), je grösser die angeschlossene Verbrauchseinheit im Vergleich zur gesamten Belastung des Speisepunktes und je grösser die gesamte Belastungsänderung $\Sigma u_n J_n$ ist, wobei allerdings vorausgesetzt wird, dass starke unmittelbare Belastungen der Speisepunkte vermieden sind. Um als Anhaltspunkte einige Zahlen zu geben, wird man für grössere Netze

$$\varepsilon_{NM} = 0{\cdot}005\ \mathcal{E} \text{ bis } 0{\cdot}01\ \mathcal{E},$$

also

$$p_{NM} = 0{\cdot}005 \text{ bis } 0{\cdot}01$$

wählen können, während bei kleineren

$$p = 0{\cdot}01 \text{ bis } 0{\cdot}015$$

zugelassen werden kann.

Die Grösse $\Sigma u_n J_n$, also die gesamte wirksame Belastungsänderung, lässt sich — wenigstens angenähert — stets dann bestimmen, wenn hervorragende Einzellasten (Theater, grosse Motoren u. dgl.) gegeben sind, die ja auch die Spannungsschwankungen am stärksten beeinflussen. Sind keine derartige Einzellasten vorhanden, so muss man die Grösse u den Umständen angemessen annehmen, und zwar wird u um so grösser bemessen werden müssen, je gleichmässiger der Wechsel der Stromabnahme nach Zeit und Ort erfolgt, je mehr also die Verbraucher eines Bezirks der gleichen Kategorie (Läden und Geschäftshäuser, Cafés, Wohnungen), die anderer Bezirke jedoch anderen Kategorien angehören, dagegen um so kleiner, je mehr alle Kategorien in den verschiedenen Bezirken gleichmässig verteilt sind, da in diesem Falle

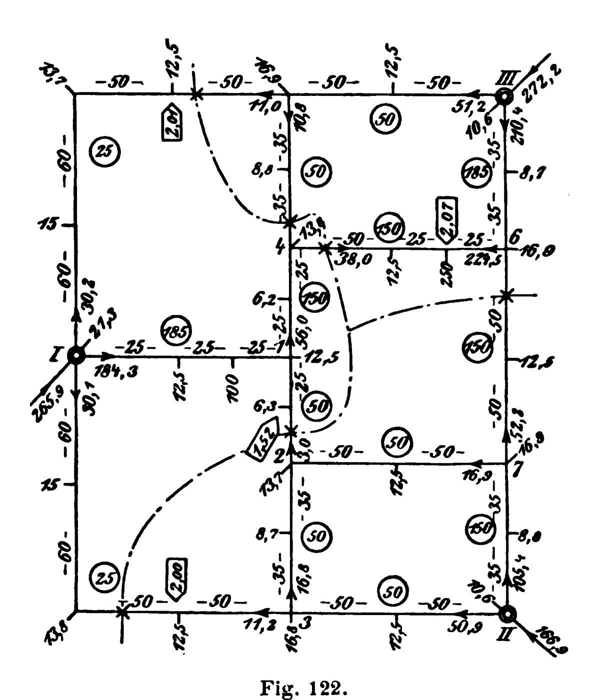


Fig. 122.

die Schwankungen durch den Wechsel der Verbraucher leichter ausgeglichen werden. Eine Bemessung von u zwischen 0·20 und 0·40 dürfte allen Anforderungen genügen, und zwar sind für grosse Netze die kleineren Werte und umgekehrt zu wählen.

Für diese Grenzen von ε_{NM} und u sind durch die Gleichungen (XXIX) bis (XXIX d) auch die Grenzen von a_{NM} festgelegt. a_{NM} wird etwa zwischen 20 und 40 anzusetzen sein; bei grossen Netzen sind die der unteren, bei kleineren Netzen die der oberen Grenze näher liegenden Werte zu fordern.

Beispiel.

Als Beispiel soll das in Fig. 122 gezeichnete Netz mit drei Speise- und sieben Knotenpunkten auf Ausgleich kontrolliert werden. Es ist für eine Netzspannung von 220 Volt bei 2 % Netzverlust und 10 % Speisekabelverlust, also für $\mathcal{E} = 110$, $\varepsilon_{max} = 2{\cdot}2$ und $\varepsilon_s = 11$ Volt berechnet. Die Belastungen sind insofern ungünstig angenommen, als bei einer verhältnismässig geringen Allgemeinbelastung — nur 0·25 Amp. oder 1 Lampe von 16 HK für den laufenden Meter Strassenlänge — zwei starke Einzellasten von 250 und 100 Amp.

vorhanden sind; dagegen liegen die Ausgleichsbedingungen günstig, weil das Netz vollständig in sich geschlossen ist.

Die Leitfähigkeiten der Verteilungskabel und die äquipotentiellen Knotenpunktsbelastungen sind in Fig. 123 eingezeichnet. Die Widerstände der drei Speisekabel sind

$$w_I = \frac{11}{266} = 41{\cdot}3; \quad w_{II} = \frac{11}{167} = 66{\cdot}0; \quad w_{III} = \frac{11}{272} = 40{\cdot}5 \text{ Milliohm},$$

also die Leitfähigkeiten

$$g_I = 24{\cdot}2; \quad g_{II} = 15{\cdot}2; \quad g_{III} = 24{\cdot}7\ \Omega^{-1}.$$

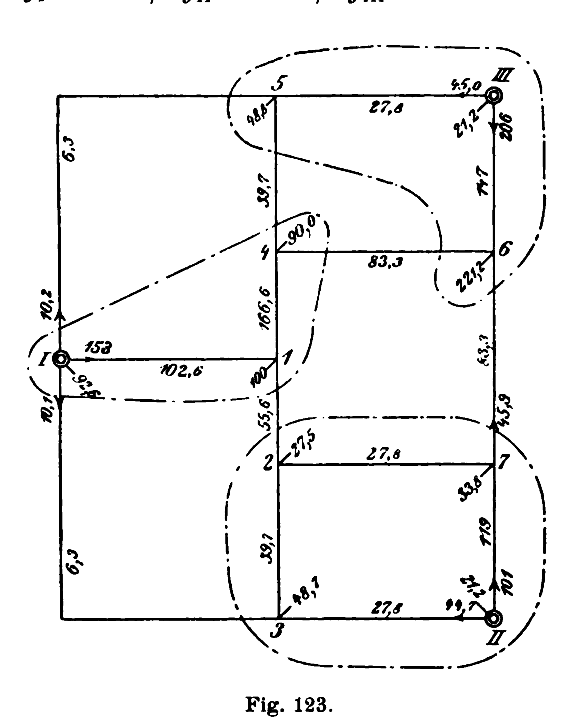


Fig. 123.

Daher sind die Leitfähigkeiten der Netzgleichungen:

$g_{0I} = 24{\cdot}2$	$g_{0II} = 15{\cdot}2$	$g_{0III} = 24{\cdot}7$	$g_{01} = 0$	$g_{02} = 0$	$g_{03} = 0$	$g_{04} = 0$	$g_{05} = 0$	$g_{06} = 0$	$g_{07} = 0)$
$g_{II} = 139{\cdot}4$	$g_{I\,II} = 0$	$g_{I\,III} = 0$	$g_{I1} = 102{\cdot}6$	$g_{I2} = 0$	$g_{I3} = 6{\cdot}3$	$g_{I4} = 0$	$g_{I5} = 6{\cdot}3$	$g_{I6} = 0$	$g_{I7} = 0$
	$g_{II\,II} = 162{\cdot}0$	$g_{II\,III} = 0$	$g_{II1} = 0$	$g_{II2} = 0$	$g_{II3} = 27{\cdot}8$	$g_{II4} = 0$	$g_{II5} = 0$	$g_{II6} = 0$	$g_{II7} = 119{\cdot}0$
		$g_{III\,III} = 199{\cdot}5$	$g_{III1} = 0$	$g_{III2} = 0$	$g_{III3} = 0$	$g_{III4} = 0$	$g_{III5} = 27{\cdot}8$	$g_{III6} = 147{\cdot}0$	$g_{III7} = 0$
			$g_{11} = 324{\cdot}8$	$g_{12} = 55{\cdot}6$	$g_{13} = 0$	$g_{14} = 166{\cdot}6$	$g_{15} = 0$	$g_{16} = 0$	$g_{17} = 0$
				$g_{22} = 123{\cdot}1$	$g_{23} = 39{\cdot}7$	$g_{24} = 0$	$g_{25} = 0$	$g_{26} = 0$	$g_{27} = 27{\cdot}8$
					$g_{33} = 73{\cdot}8$	$g_{34} = 0$	$g_{35} = 0$	$g_{36} = 0$	$g_{37} = 0$
						$g_{44} = 289{\cdot}6$	$g_{45} = 39{\cdot}7$	$g_{46} = 83{\cdot}3$	$g_{47} = 0$
							$g_{55} = 73{\cdot}8$	$g_{56} = 0$	$g_{57} = 0$
								$g_{66} = 313{\cdot}6$	$g_{67} = 83{\cdot}3$
									$g_{77} = 230{\cdot}1$

Die Berechnung der $\varrho_{N\nu}$ ergiebt mit Hilfe des GAUSSschen Verfahrens [82], wenn die Speisepunkte *I*, *II* und *III* einzeln mit der Stromeinheit belastet werden, die Werte

			Knoten	gehört zu Speisepunkt
$\varrho_{II} = 0{\cdot}0216$				
$\varrho_{III} = 0{\cdot}0121$	$\varrho_{IIII} = 0{\cdot}0246$			
$\varrho_{IIII} = 0{\cdot}0119$	$\varrho_{IIIII} = 0{\cdot}0135$	$\varrho_{IIIIII} = 0{\cdot}0206$		
$\varrho_{I1} = 0{\cdot}0178$	$\varrho_{II1} = 0{\cdot}0144$	$\varrho_{III1} = 0{\cdot}0142$	1	*I*
$\varrho_{I2} = 0{\cdot}0157$	$\varrho_{II2} = 0{\cdot}0175$	$\varrho_{III2} = 0{\cdot}0142$	2	*II*
$\varrho_{I3} = 0{\cdot}0148$	$\varrho_{II3} = 0{\cdot}0197$	$\varrho_{III3} = 0{\cdot}0136$	3	*II*
$\varrho_{I4} = 0{\cdot}0161$	$\varrho_{II4} = 0{\cdot}0147$	$\varrho_{III4} = 0{\cdot}0157$	4	*I*
$\varrho_{I5} = 0{\cdot}0150$	$\varrho_{II5} = 0{\cdot}0140$	$\varrho_{III5} = 0{\cdot}0173$	5	*III*
$\varrho_{I6} = 0{\cdot}0133$	$\varrho_{II6} = 0{\cdot}0157$	$\varrho_{III6} = 0{\cdot}0178$	6	*III*
$\varrho_{I7} = 0{\cdot}0130$	$\varrho_{II7} = 0{\cdot}0205$	$\varrho_{III7} = 0{\cdot}0151$	7	*II*

durch die sofort die erste gröbere Teilung des Netzes in Ausgleichsbezirke ermöglicht wird, da jeder Knotenpunkt zu demjenigen Bezirk gehört, dessen ϱ den grössten Wert besitzt; die ϱ-Differenzen [**103**] sollen ja für jeden Bezirk positiv sein. Die Zugehörigkeit der einzelnen Knotenpunkte zu den Speisepunktsbezirken ist neben den ϱ-Werten angegeben; in Fig. 123 sind die einzelnen Bezirke durch strichpunktierte Linien abgegrenzt. Die zu zwei Bezirken gehörenden Verteilungsleiter sind nun gemäss Gleichung (191) und (188) zu teilen. Es wird für Strecke

$$I\,3:\quad \begin{array}{rr} \varrho_{II3} = & 0{\cdot}0197 \\ -\varrho_{I3} = & 148 \\ \hline & 0{\cdot}0049 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} \varrho_{II} = & 0{\cdot}0216 \\ -\varrho_{III} = & 121 \\ \hline & 0{\cdot}0095 \end{array} \qquad f_{3I} = \frac{49}{95} = 0{\cdot}52;\quad \lambda_{I3} = \frac{1}{1{\cdot}52};\quad \lambda_{I3}\, l_{I3} = 145 \text{ m.}$$

$$1\,2:\quad \begin{array}{rr} \varrho_{I2} = & 0{\cdot}0175 \\ -\varrho_{II2} = & 157 \\ \hline & 0{\cdot}0018 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} \varrho_{I1} = & 0{\cdot}0178 \\ -\varrho_{II1} = & 144 \\ \hline & 0{\cdot}0034 \end{array} \qquad f_{21} = 0{\cdot}53;\quad \lambda_{12} = 0{\cdot}65;\quad \lambda_{12}\, l_{12} = 33 \text{ m.}$$

$$I\,5:\quad \begin{array}{rr} \varrho_{III5} = & 0{\cdot}0173 \\ -\varrho_{I5} = & 150 \\ \hline & 0{\cdot}0023 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} \varrho_{II} = & 0{\cdot}0216 \\ -\varrho_{IIII} = & 119 \\ \hline & 0{\cdot}0097 \end{array} \qquad f_{5I} = 0{\cdot}24;\quad \lambda_{I5} = 0{\cdot}81;\quad \lambda_{I5}\, l_{I5} = 178 \text{ m.}$$

$$4\,5:\quad \begin{array}{rr} \varrho_{III5} = & 0{\cdot}0173 \\ -\varrho_{I5} = & 150 \\ \hline & 0{\cdot}0023 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} \varrho_{I4} = & 0{\cdot}0161 \\ -\varrho_{III4} = & 157 \\ \hline & 0{\cdot}0004 \end{array} \qquad f_{54} = 5{\cdot}8;\quad \lambda_{45} = 0{\cdot}15;\quad \lambda_{45}\, l_{45} = 10 \text{ m.}$$

$$4\,6:\quad \begin{array}{rr} \varrho_{III6} = & 0{\cdot}0178 \\ -\varrho_{I6} = & 133 \\ \hline & 0{\cdot}0045 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} \varrho_{I4} = & 0{\cdot}0161 \\ -\varrho_{III4} = & 157 \\ \hline & 0{\cdot}0004 \end{array} \qquad f_{64} = 11{\cdot}2;\quad \lambda_{46} = 0{\cdot}08;\quad \lambda_{46}\, l_{46} = 8 \text{ m.}$$

$$6\,7:\quad \begin{array}{rr} \varrho_{II7} = & 0{\cdot}0205 \\ -\varrho_{III7} = & 151 \\ \hline & 0{\cdot}0054 \end{array} \qquad \begin{array}{rr} \varrho_{III6} = & 0{\cdot}0178 \\ -\varrho_{II6} = & 157 \\ \hline & 0{\cdot}0021 \end{array} \qquad f_{76} = 2{\cdot}6;\quad \lambda_{67} = 0{\cdot}28;\quad \lambda_{67}\, l_{67} = 28 \text{ m.}$$

Diese Zahlen geben die in Fig. 122 durch strichpunktierte Linien gekennzeichneten Grenzen der Netzbezirke, die für gleichzeitige Belastungsänderungen in Frage kommen.

Wir wollen nun die folgenden beiden Fälle untersuchen:

1. Jeder Bezirk wird im ganzen um 33 % entlastet.
2. Jede der grossen Einzellasten wird um 100 % entlastet.

ad 1) Bezirk I.

In Anwendung gelangen hier die Gleichungen (XXVIII d), (XXIX d), (188) und (193), und zwar erhalten sie für den vorliegenden Fall die folgende Form:

Ausgleich $I\,II$ | Ausgleich $I\,III$

$$a_{I\,II} = \frac{w_I \,\Sigma u_n J_n}{\Sigma(\varrho_{In} - \varrho_{IIn}) u_n J_n} \cdot \frac{1}{p_s} \qquad a_{I\,III} = \frac{w_I \,\Sigma u_n J_n}{\Sigma(\varrho_{In} - \varrho_{IIIn}) u_n J_n} \cdot \frac{1}{p_s}; \; n = I, 1.$$

$$p_{I\,II} = \frac{\Sigma u_n J_n}{a_{I\,II} J_{0I}} \qquad p_{I\,III} = \frac{\Sigma u_n J_n}{\cdot_{I\,III} J_{0I}}$$

$$f_{mn} = \frac{\varrho_{IIm} - \varrho_{Im}}{\varrho_{In} - \varrho_{IIn}} \qquad f_{mn} = \frac{\varrho_{IIIm} - \varrho_{Im}}{\varrho_{In} - \varrho_{IIIn}}; \quad m = 1, 2, 4, 5.$$

$$u_n J_n = \Sigma u_n (i_\nu)_n = 0{\cdot}33 \; \Sigma i_\nu \left[1 - \lambda\,(1 + f_{mn})\right].$$

Bestimmung der Grössen f_{mn}.

Strecke $I\,1$ $(n = I,\; m = 1)$.

$$\varrho_{II1} - \varrho_{I1} = -0{\cdot}0034 \qquad \varrho_{III1} - \varrho_{I1} = -0{\cdot}0046$$

$$\varrho_{II} - \varrho_{III} = 0{\cdot}0095 \qquad \varrho_{II} - \varrho_{IIII} = 0{\cdot}0097$$

$$1 + f_{1I} = 0{\cdot}65 \qquad 1 + f_{1I} = 0{\cdot}53.$$

Strecke I 3.

$$1 + f_{3I} = 1{\cdot}52 \qquad 1 + f_{3I} = 0{\cdot}88$$

Strecke I 5.

$$1 + f_{5I} = 0{\cdot}90 \qquad 1 + f_{5I} = 1{\cdot}24$$

Strecke 12.

$$1 + f_{21} = 1{\cdot}65 \qquad 1 + f_{21} = 0{\cdot}67$$

Strecke 14.

$$1 + f_{41} = 0{\cdot}59 \qquad 1 + f_{41} = 0{\cdot}91.$$

Übertragung der wirksamen Belastungsänderungen auf I und 1.

Strecke I 1	21·3 · 1 = 21·3	21·3 · 1 = 21·3
	12·5 · 0·67 = 8·4	12·5 · 0·73 = 9·1
	100 · 0·51 = 51·0	100 · 0·60 = 60·0
	12·5 · 0·35 = 4·4	12·5 · 0·47 = 5·9
I 3	15 · 0·59 = 8·9	15 · 0·76 = 11·4
	13·8 · 0·17 = 2·3	13·8 · 0·52 = 7·2
I 5	15 · 0·75 = 11·3	15 · 0·64 = 9·6
	13·7 · 0·51 = 7·0	13·7 · 0·32 = 4·4
	12·5 · 0·30 = 3·7	12·5 · 0·07 = 0·9
	$u_I J_I$ = 118·3 · 0·33 = 39·1	$u_I J_I$ = 129·8 · 0·33 = 42·8

$$(\varrho_{II} - \varrho_{III}) \cdot 39{\cdot}1 = 0{\cdot}39 \qquad (\varrho_{II} - \varrho_{IIII})\; 42{\cdot}8 = 0{\cdot}43$$

12	$6{\cdot}3 \cdot 0{\cdot}18 = 1{\cdot}1$	$6{\cdot}3 \cdot 0{\cdot}67 = 4{\cdot}2$
14	$6{\cdot}2 \cdot 0{\cdot}70 = 4{\cdot}3$	$6{\cdot}2 \cdot 0{\cdot}55 = 3{\cdot}4$
	$13{\cdot}8 \cdot 0{\cdot}31 = 4{\cdot}3$	$13{\cdot}8 \cdot 0{\cdot}09 = 1{\cdot}2$
	$u_1 J_1 = 9{\cdot}7 \cdot 0{\cdot}33 = 3{\cdot}2$	$u_1 J_1 = 9{\cdot}0 \cdot 0{\cdot}33 = 3{\cdot}0$

$(\varrho_{I1} - \varrho_{II1})\, 3{\cdot}2 = 0{\cdot}01$ $\qquad (\varrho_{I1} - \varrho_{III1})\, 3{\cdot}0 = 0{\cdot}01$

$\Sigma u_n J_n = 42{\cdot}3$ $\qquad \Sigma u_n J_n = 45{\cdot}8$

$\Sigma (\varrho_{In} - \varrho_{IIn})\, u_n J_n = 0{\cdot}40$ $\qquad \Sigma (\varrho_{In} - \varrho_{IIIn})\, u_n J_n = 0{\cdot}44.$

$$a_{I\,II} = \frac{41{\cdot}3 \cdot 10^{-3} \cdot 42{\cdot}3}{0{\cdot}40 \cdot 0{\cdot}10} = 44 \qquad a_{I\,III} = \frac{41{\cdot}3 \cdot 10^{-3} \cdot 45{\cdot}8}{0{\cdot}44 \cdot 0{\cdot}10} = 47$$

$$p_{I\,II} = \frac{42{\cdot}3}{44 \cdot 266} = 0{\cdot}0036 \qquad p_{I\,III} = \frac{45{\cdot}8}{47 \cdot 266} = 0{\cdot}0037$$

$$\varepsilon_{I\,II} = 0{\cdot}0036 \cdot 110 = 0{\cdot}40 \text{ Volt} \qquad \varepsilon_{I\,III} = 0{\cdot}0037 \cdot 110 = 0{\cdot}41 \text{ Volt.}$$

ad 1) Bezirk III.

Strecke III 6.

$1 + f_{6\,III} = 0{\cdot}48$ $\qquad 1 + f_{6\,III} = 0{\cdot}70$

Strecke III 5.

$1 + f_{5\,III} = 0{\cdot}80$ $\qquad 1 + f_{5\,III} = 0{\cdot}62$

Strecke 54.

$1 + f_{45} = 1{\cdot}17$ $\qquad 1 + f_{45} = 0{\cdot}70$

Strecke 64.

$1 + f_{46} = 1{\cdot}09$ $\qquad 1 + f_{46} = 0{\cdot}52.$

Übertragung der wirksamen Belastungsänderungen auf III, 5 und 6.

Strecke III 6	$10{\cdot}6 \cdot 1 = 10{\cdot}6$	$10{\cdot}6 \cdot 1 = 10{\cdot}6$
	$8{\cdot}7 \cdot 0{\cdot}76 = 6{\cdot}6$	$8{\cdot}7 \cdot 0{\cdot}65 = 5{\cdot}6$
	$16{\cdot}9 \cdot 0{\cdot}52 = 8{\cdot}8$	$16{\cdot}9 \cdot 0{\cdot}30 = 5{\cdot}1$
III 5	$12{\cdot}5 \cdot 0{\cdot}60 = 7{\cdot}5$	$12{\cdot}5 \cdot 0{\cdot}69 = 8{\cdot}6$
	$16{\cdot}9 \cdot 0{\cdot}20 = 3{\cdot}4$	$16{\cdot}9 \cdot 0{\cdot}38 = 6{\cdot}4$
	$u_{III} J_{III} = 36{\cdot}9 \cdot 0{\cdot}33 = 12{\cdot}2$	$u_{III} J_{III} = 36{\cdot}3 \cdot 0{\cdot}33 = 12{\cdot}0$

$(\varrho_{III\,III} - \varrho_{I\,III})\, 12{\cdot}2 = 0{\cdot}09.$ $\qquad (\varrho_{III\,III} - \varrho_{II\,III})\, 12{\cdot}0 = 0{\cdot}09.$

54.	$8{\cdot}8 \cdot 0{\cdot}42 = 3{\cdot}7$	$8{\cdot}8 \cdot 0{\cdot}65 = 5{\cdot}7$
	$u_5 J_5 = 3{\cdot}7 \cdot 0{\cdot}33 = 1{\cdot}2$	$u_5 J_5 = 5{\cdot}7 \cdot 0{\cdot}33 = 1{\cdot}9$

$(\varrho_{III\,5} - \varrho_{I\,5})\, 1{\cdot}2 = 0{\cdot}00$ $\qquad (\varrho_{III\,5} - \varrho_{II\,5})\, 1{\cdot}9 = 0{\cdot}00$

64.	$250 \cdot 0{\cdot}73 = 182{\cdot}0$	$250 \cdot 0{\cdot}87 = 217{\cdot}5$
	$12{\cdot}5 \cdot 0{\cdot}45 = 5{\cdot}6$	$12{\cdot}5 \cdot 0{\cdot}74 = 9{\cdot}3$
	$u_6 J_6 = 187{\cdot}6 \cdot 0{\cdot}33 = 62{\cdot}0$	$u_6 J_6 = 226{\cdot}8 \cdot 0{\cdot}33 = 75{\cdot}0$

$(\varrho_{III\,6} - \varrho_{I\,6})\, 62{\cdot}0 = 0{\cdot}28$ $\qquad (\varrho_{III\,6} - \varrho_{II\,6})\, 75{\cdot}0 = 0{\cdot}16$

$\Sigma u_n J_n = 75{\cdot}4$ $\qquad \Sigma u_n J_n = 88{\cdot}9$

$$\Sigma(\varrho_{III n} - \varrho_{I n})\, u_n J_n = 0{\cdot}37 \qquad \Sigma(\varrho_{III n} - \varrho_{II n})\, u_n J_n = 0{\cdot}25$$

$$a_{III I} = \frac{40{\cdot}5 \cdot 10^{-3} \cdot 75{\cdot}4}{0{\cdot}37 \cdot 0{\cdot}10} = 82 \qquad a_{III II} = \frac{40{\cdot}5 \cdot 10^{-3} \cdot 88{\cdot}9}{0{\cdot}25 \cdot 0{\cdot}10} = 144$$

$$p_{III I} = \frac{75{\cdot}4}{82 \cdot 272} = 0{\cdot}0034 \qquad p_{III II} = \frac{88{\cdot}9}{144 \cdot 272} = 0{\cdot}0023$$

$$\varepsilon_{III I} = 0{\cdot}37. \qquad \varepsilon_{III II} = 0{\cdot}25.$$

Den Ausgleich des Bezirks II brauchen wir nicht zu berechnen, da er nach den bisherigen günstigen Ergebnissen auch genügen dürfte.

Als Kontrolle wurden die neuen Knotenpunktsbelastungen, wie sie sich für den nur 33 % entlasteten Bezirk I berechnen, in die ersten drei Gleichungen des Systems (178) (S. 176) eingesetzt. Es ergaben sich die Spannungsverluste

$$\varepsilon_I = 9{\cdot}48; \quad \varepsilon_{II} = 9{\cdot}86; \quad \varepsilon_{III} = 9{\cdot}89,$$

so dass in der That mit genügender Übereinstimmung

$$\varepsilon_{I\,II} = 0{\cdot}38 \text{ und } \varepsilon_{I\,III} = 0{\cdot}41$$

erhalten wird.

ad 2) Belastung 250 Amp. in Bezirk III vollständig entlastet.

Die wirksame Belastungsänderung wird auf den Knotenpunkt 6 übertragen; es treten die Gleichungen (XXVIII c), (XXIX c), (188) und (189) in Wirksamkeit, und zwar lauten sie für diesen Fall:

$$a_{III I} = \frac{1}{\varrho_{III 6} - \varrho_{I 6}} \cdot \frac{w_{III}}{p_e} \qquad a_{III II} = \frac{1}{\varrho_{III 6} - \varrho_{II 6}} \cdot \frac{w_{III}}{p_e}$$

$$p_{III I} = \frac{u_6 J_6}{a_{III I} J_{0 III}} \qquad p_{III II} = \frac{u_6 J_6}{a_{III II} J_{0 III}}$$

$$f_{46} = \frac{\varrho_{I 4} - \varrho_{III 4}}{\varrho_{III 6} - \varrho_{I 6}} \qquad f_{46} = \frac{\varrho_{II 4} - \varrho_{III 4}}{\varrho_{III 6} - \varrho_{II 6}}$$

$$u_6 J_6 = 250\,[1 - 0{\cdot}25\,(1 + f_{46})].$$

Nach dem Vorhergehenden ist

$$1 + f_{46} = 1{\cdot}09 \qquad 1 + f_{46} = 0{\cdot}52$$

$$u_6 J_6 = 250 \cdot 0{\cdot}73 = 182{\cdot}0 \qquad u_6 J_6 = 250 \cdot 0{\cdot}87 = 217{\cdot}5.$$

Also wird

$$a_{III I} = \frac{40{\cdot}5 \cdot 10^{-3}}{0{\cdot}0045 \cdot 0{\cdot}10} = 90 \qquad a_{III II} = \frac{40{\cdot}5 \cdot 10^{-3}}{0{\cdot}0021 \cdot 0{\cdot}10} = 192.$$

Die Ausgleichsgrössen sind so reichlich, dass wir auf die Berechnung des Ausgleichs für die Belastung 100 Amp. im Bezirk I verzichten können. Dieses Beispiel mit seinen in bezug auf die Belastung ungünstigen, in bezug auf prozentuale Spannungsverluste im Verteilungs- und Speisenetz jedenfalls nicht gerade günstigen Verhältnissen ergiebt überhaupt so vorzügliche Ausgleichswerte, dass der Schluss nicht unberechtigt zu sein scheint, dass in sich vollständig geschlossene Netze im allgemeinen stets einen genügenden Ausgleich aufweisen werden und nur in Ausnahmefällen durch Ausgleichs-

leiter oder verstärkte Verteilungsleiter für eine Besserung des Ausgleichs gesorgt werden muss. Anders liegen allerdings die Verhältnisse, wenn ein Netz aus mehreren, nur durch einzelne Stränge zusammenhängenden Teilen besteht, da dann leichter grössere Potentialunterschiede zwischen einzelnen Speisepunkten auftreten können.

Für das gleiche Netz wurde der Ausgleich auch nach Gleichung (XXVIII) (S. 166) berechnet, indem es, allerdings zur Vereinfachung unter Vernachlässigung einiger Querleiter geringeren Querschnitts, widerstandstreu zum einfachen Strang umgebildet wurde. Die erhaltenen Werte sind für Bezirk I und III:

$$a_{I\,II} = 35; \quad a_{I\,III} = 22; \quad a_{III\,I} = 48; \quad a_{III\,II} = 32.$$

Es ergab sich also das bemerkenswerte Resultat, dass die erhaltenen Zahlen zum Teil ganz wesentlich kleiner sind, offenbar infolge der zulässig erachteten Vernachlässigung von Querleitern. Es folgt ja auch aus unseren Entwickelungen, dass eine einheitliche Ausgleichsgrösse für einen Netzbezirk nicht vorhanden ist, da sie von seiner Belastungsänderung abhängig ist.

Wechselstromnetze.

107. Bestandteile des Wechselstromnetzes. Der Wechselstrom hat vor dem Gleichstrom den grossen Vorteil der leichten Transformierbarkeit mittels ruhender Apparate, der Transformatoren, so dass man den ersteren gern in solchen Anlagen verwendet, deren Verbrauchsgebiet sehr ausgedehnt oder deren Energiequelle vom Ort des Verbrauchs sehr weit entfernt ist, da, wie wir noch sehen werden, die Kosten des Netzes bei den normalen Glühlampenspannungen für grössere Entfernungen bald so hoch werden, dass die Rentabilität der Unternehmung nicht genügt. Ferner wird es sich zeigen, dass die Leitungskosten sich umgekehrt proportional zu dem Quadrat der angewendeten Betriebsspannung verhalten. Man verwendet daher für die Übertragung weit entfernter Energiequellen hochgespannten Wechselstrom, der im Verteilungsgebiet in den für den Betrieb der verschiedenen Verbrauchsapparate nötigen niedrig gespannten Strom transformiert wird. Die Transformatoren sind daher das Bindeglied zwischen dem hoch- und niedergespannten Strom; ihre Hochspannungsseite bildet den Verbrauchsapparat gegenüber den Hochspannungsenergieerzeugern, ihre Niederspannungsseite dagegen den Energieerzeuger für die Niederspannungsverbraucher. Wir haben also im allgemeinen viele Hochspannungsverbrauchsapparate gegenüber einem Energieerzeuger, bedürfen also stets eines Hochspannungsnetzes, des „Primärnetzes“, das die ersteren miteinander und mit dem letzteren verbindet und, wenn nötig, die infolge veränderlichen Energieverbrauchs entstehenden Spannungsschwankungen ausgleicht. Dagegen brauchen wir hier nicht notwendiger Weise ein Niederspannungsnetz, ein „Sekundärnetz“, da ja für jeden Energieverbraucher ein besonderer Transformator als Energieerzeuger an das vorhandene Primärnetz angeschlossen werden könnte, der noch dazu jede beliebige, dem Verbraucher günstigste Sekundärspannung zu liefern imstande ist.

In der That wird man auch auf die Verlegung eines besonderen Sekundärnetzes verzichten und an jeder Verbrauchsstelle einen eigenen Transformator aufstellen, wenn die einzelnen Energieverbraucher grosse Energiemengen be-

nötigen und voneinander weit entfernt liegen (über ein grösseres Verteilungsgebiet verstreute Fabrikanlagen, Überlandcentralen), denn hier würden die Kosten des Verteilungsnetzes überwiegen. Liegen dagegen viele kleine Energieverbraucher eng beisammen (Licht- und Energieverteilung in Städten), so ist es vorteilhaft, ein oder auch mehrere voneinander getrennte Sekundärnetze an die Stelle der vielen kleinen Transformatoren zu setzen, da nunmehr die Kosten für die Aufstellung und den Betrieb der letzteren — dauernder Verlust der Magnetisierungsarbeit — überwiegen würden. Hier ist naturgemäss auch die sekundäre Betriebsspannung einheitlich, nämlich die Netzspannung. Eine Vereinigung beider Anordnungen zu einem gemischten System ist natürlich möglich und für grosse Verbrauchseinheiten und besonders bei ausgedehnten Überlandcentralen am Orte.

In bezug auf die Kosten entscheidet ein einfacher Kostenüberschlag in jedem Falle, ob ein Sekundärnetz oder Einzeltransformatoren den Vorzug verdienen. In technischer Hinsicht ist in Betracht zu ziehen, dass das Sekundärnetz dem Spannungsausgleich günstig ist, daher grössere Spannungsverluste im Primärnetz gestattet; andererseits haben die Einzeltransformatoren den Vorteil, sekundär vollständig unabhängig voneinander zu sein, sie bieten also eine grössere Betriebssicherheit, da ein Fehler im Niederspannungsnetz nur den betreffenden Energieverbraucher ausser Betrieb setzt, während bei zusammenhängendem Sekundärnetz stets ein grösserer Bezirk in Mitleidenschaft gezogen wird.

108. Das Sekundärnetz.

Die Berechnung des Sekundärnetzes einer Wechselstromzweileiteranlage unterscheidet sich in nichts von der eines Gleichstromnetzes, so lange die Belastung nicht induktiver Natur ist, so lange es sich also ausschliesslich oder vorwiegend um Lichtverteilung handelt. Denn wie wir bereits gesehen haben [**87**], sind die Kabellängen und die Spannungen sekundärer Netze nicht genügend, um die Wirkung der ihnen eigenen Kapazität und Induktivität merkbar werden zu lassen. An die Stelle der äquipotentiellen Speisepunkte treten hier die Sekundärklemmen der Transformatoren, denen der Voraussetzung nach durch das Primärnetz gleiche und konstante Spannung zugeführt wird.

Der zulässige Spannungsabfall beträgt, wie bereits gezeigt [**57**],

$$\frac{\varepsilon}{\cos\varphi} = \frac{p}{\cos\varphi}\,\mathcal{E}\ \text{Volt},$$

wenn ε der unter gleichen Verhältnissen zulässige Spannungsverlust bei Gleichstromleitungen ist.

Bei induktiver Belastung (Motoren, Drosselspulen) hat man gemäss [**57**] die Ströme in ihre beiden Komponenten, die Energiekomponente und die energielose Komponente, zu zerfällen und für jede dieser Belastungen die Strom- und Spannungsverteilung des Netzes unabhängig zu bestimmen. Die vektorielle Zusammensetzung beider Ergebnisse für alle Netzteile liefert die endgültige Strom- und Spannungsverteilung des Netzes und zugleich die Phasenverschiebung der Leiterströme.

Auch für die Ausgleichsrechnungen gelten diese Bemerkungen, da sie ja nichts anderes bedeuten, als eine Neuberechnung des Netzes bei veränderter Belastung.

Ein Nachteil, der bei gemischter Belastung (Licht und mechanische Energie) schwer ins Gewicht fällt, ist der grosse Anlaufsstrom der Wechsel-

strommotoren, der bei grosser Phasenverschiebung meist das zwei- bis dreifache des normalen Volllaststromes beträgt. Denn durch ihn werden, besonders bei grossen Motoren, vielfach derartige Schwankungen der Netzspannung verursacht, dass sie für den Lichtbetrieb störend wirken. Man giebt daher gern grösseren Motoren eigene Transformatoren und sieht, falls der Verbrauch für mechanische Energie bedeutend ist, für diesen ein eigenes Netz vor, in dem ein grösserer Spannungsverlust — etwa 5 bis 10 $^0/_0$ — zulässig ist.

109. Das Primärnetz. Die Belastung des Primärnetzes ist stets induktiv, da sie ja durch die Transformatoren gebildet wird. Dagegen sind bei den hohen Spannungen die die Belastung bildenden Ströme von geringer Grösse, so dass nur eine geringe Zahl äquipotentieller Speisepunkte, die weit voneinander entfernt liegen, nötig wird, um so mehr, als der absolut zulässige Spannungsverlust selbst bei geringen prozentualen Verlusten gross ist. So lange die Kabel des eigentlichen geschlossenen Primärnetzes keine allzu grossen Längen besitzen, kann auch hier die Wirkung von Kapazität und Induktivität vernachlässigt werden. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich also um geschlossene Primärnetze von grosser Ausdehnung, so sind die Impedanzen und Admittanzen der Kabel an Stelle der Widerstände und Leitfähigkeiten in Rechnung zu setzen. Die Gültigkeit der Netzgleichungen wird dadurch nicht beseitigt, es ergeben sich jedoch, wie im Abschnitt [87] gezeigt, in diesem Falle 2 n Gleichungen mit 2 n Unbekannten, nämlich den Energiekomponenten und den energielosen Komponenten der Knotenpunktsspannungsverluste.

Hier kann ferner der Fall eintreten, dass die Bedingung für die Konvergenz des GAUSS schen Verfahrens

$$g_{\mu\nu} \geqq \Sigma g_{\mu\nu} \left(\mu \gtrless \nu\right)$$

nicht erfüllt ist; dagegen bleibt stets

$$g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$$

und es kann daher zur Lösung der Netzgleichungen das VERHOECKX sche Verfahren [83 ff.] angewendet werden.

Da die Primärnetze bei der grossen Entfernung der auf konstantem bezw. gleichem Potential zu haltenden Speisepunkte sehr einfacher Natur sind und nur wenige Maschen und Knoten zu bilden pflegen, so ist die Anzahl der zu lösenden Gleichungen meist gering und daher ihre Lösung einfacher als bei Niederspannungsnetzen. Dagegen ist, gerade wegen der geringen Zahl der Speisepunkte und der vielfach nicht geschlossenen Form der Hochspannungsnetze, um so mehr die Berechnung auf Ausgleich geboten [95 ff.].

Der Spannungsverlust in den Primärnetzen wird meist sehr niedrig gehalten werden können und sehr selten 1 $^0/_0$ der Betriebsspannung übersteigen.

Die Querschnittsberechnung in geschlossenen Leitungsnetzen.

110. Die Grundlagen für die Projektierung von Netzen.

Die bisherigen Betrachtungen wurden ausnahmslos an vorhandenen, in ihren Einzelteilen gegebenen Netzen angestellt und entsprechen daher denjenigen Rechnungen, die der Betriebsingenieur einer Centrale zur ständigen Beaufsichtigung seiner Anlage, und der entwerfende Ingenieur zur Vergleichung zweier oder mehrerer Anschläge auf ihre Vor- und Nachteile auszuführen hat. Ist uns dagegen die Aufgabe gestellt, ein solches Netz überhaupt erst zu entwerfen und zu berechnen, so beschränken sich im günstigsten Falle die gegebenen Grundlagen für die Berechnung auf die Grösse und Lage der Verbrauchsstellen und auf den Ort der Centrale. Das eigentliche Netz zwar, soweit es die Verteilungsleiter selbst betrifft, ist leicht hergestellt; man hat nur die Verbindung der einzelnen Verbraucher durch Kabelzüge längs den in Frage kommenden Strassen zu bewerkstelligen und erhält dadurch das Netz mit seinen Kreuzungspunkten an den Strassenecken. Zu beachten ist nur, dass jeder Verbraucher den Strom von mindestens zwei Seiten her muss erhalten können, dass man also das Netz in möglichst geschlossener Form verlegt, damit Störungsgebiete thunlichst eingeschränkt werden und der Ausgleich sich möglichst günstig gestaltet. Zur Aufstellung der Netzgleichungen bezw. zur Berechnung der Kabelquerschnitte muss aber bereits die Zahl und Lage der Speisepunkte bekannt sein, es wäre also unsere erste Aufgabe, diese zu bestimmen. Andererseits brauchen wir zur Entwickelung der Theorie für die Berechnung der günstigsten Zahl der Speisepunkte bereits die Kenntnis der Bemessung der Verteilungsleiter, da ja die vorteilhafteste Speisepunktzahl nur durch Vergleich der Gesamtkosten des Netzes bei verschiedenen diesbezüglichen Annahmen gefunden werden kann. Wir nehmen daher zunächst an, die Lage der Centrale sowohl als auch der Speisepunkte sei zugleich mit der Belastung gegeben und wir sollen nun die Verteilungsleitungen berechnen.

111. Die Querschnittsberechnung geschlossener Netze. Gleichungsmethode.

Der erste Schritt bei der Berechnung geschlossener Netze bestand stets darin, die auf die einzelnen Leiter verteilten Belastungen auf die Knotenpunkte äquipotentiell zu übertragen, um dann zur Aufstellung der Netzgleichungen zu schreiten. Diese Übertragung können wir auch hier ohne weiteres vornehmen, denn aus praktischen Gründen wird der Querschnitt

zwischen zwei Kreuzungspunkten stets einheitlich gewählt, da, wie bereits früher vielfach erwähnt, eine Querschnittsänderung in diesem Bereich wegen der notwendigen Verbindungsstücke und Lötarbeit einerseits die Ersparnis an Leitermetall vielfach wieder aufheben würde, andererseits aber durch solche Verbindungsstellen in bezug auf Isolation schwache Punkte geschaffen würden, die man gern vermeidet. Schliesslich soll bei einer Störung an einer Stelle die Stromlieferung auch von der anderen Seite her erfolgen können; auch aus diesem Grunde ist daher ein konstanter Querschnitt vorzuziehen. Wir können also auch hier wieder Netze voraussetzen, die nur in den Kreuzungspunkten belastet sind.

Der zweite Schritt wäre nun der, die Spannungs- oder Stromverteilung zu bestimmen. Sobald diese bekannt ist, ist auch die Berechnung der Querschnitte ermöglicht, denn wir können dann, wie wir wissen, in den Punkten grössten Spannungsverlustes die Leiter aufschneiden, ohne die Stromverteilung zu ändern und erhalten so lauter offene Leiterverzweigungen, deren Bemessung bereits in den Abschnitten [**42 ff.**] behandelt worden ist.

Führen wir nun in die Netzgleichungen anstatt der Leitfähigkeiten die zu berechnenden Leiterquerschnitte ein, so erhält das Gleichungssystem (XXVII) [**76**] die folgende Form:

$$\left.\begin{array}{l} \Sigma \frac{q_{1\nu}}{l_{1\nu}} \varepsilon_1 - \frac{q_{12}}{l_{12}} \varepsilon_2 - \cdots - \frac{q_{1\nu}}{l_{1\nu}} \varepsilon_\nu - \cdots - \frac{q_{1n}}{l_{1n}} \varepsilon_n = \varrho J_1 \\ - \frac{q_{21}}{l_{21}} \varepsilon_1 + \Sigma \frac{q_{2\nu}}{l_{2\nu}} \varepsilon_2 - \cdots - \frac{q_{2\nu}}{l_{2\nu}} \varepsilon_\nu - \cdots - \frac{q_{2n}}{l_{2n}} \varepsilon_n = \varrho J_2 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \end{array}\right\} \quad (194)$$

worin die Summen über alle in den betreffenden Knotenpunkten zusammenlaufenden Leiter zu erstrecken sind. Hier sind aber sowohl die einzelnen ε als auch sämtliche q unbekannt, denn die Spannungsverluste haben ja nur die eine Bedingung zu erfüllen, einen gegebenen maximalen Wert nicht zu überschreiten. In dieser Form sind also die Gleichungen nicht zur Lösung des Problems geeignet, da sie es nicht vollständig bestimmen. Wir können aber willkürlich noch eine Anzahl Bedingungen sowohl für die Grössen ε als für die Querschnitte einführen, die geeignet sind, die Aufgabe eindeutig zu gestalten.

Wir nehmen nun an, das Verhältnis der Querschnitte zu einander sei bekannt. Wir wissen ja bereits, dass man in der Praxis stets danach strebt, in einem Netz möglichst wenig verschiedene Querschnitte zu verwenden, und diesem Streben kommt die eben gemachte Voraussetzung entgegen. Wir setzen also:

$$q_{\nu\mu} = k_{\nu\mu}\, q,$$

worin die k bekannt sein sollen, und erhalten so aus System (194):

$$\left.\begin{array}{l} \Sigma \frac{k_{1\nu}}{l_{1\nu}} \varepsilon_1 q - \frac{k_{12}}{l_{12}} \varepsilon_2 q - \cdots - \frac{k_{1\nu}}{l_{1\nu}} \varepsilon_\nu q - \cdots - \frac{k_{1n}}{l_{1n}} \varepsilon_n q = \varrho J_1 \\ - \frac{k_{21}}{l_{21}} \varepsilon_1 q + \Sigma \frac{k_{2\nu}}{l_{2\nu}} \varepsilon_2 q - \cdots - \frac{k_{2\nu}}{l_{2\nu}} \varepsilon_\nu q - \cdots - \frac{k_{2n}}{l_{2n}} \varepsilon_n q = \varrho J_2 \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \end{array}\right\} \quad (XXXII)$$

Betrachten wir hier die $\varepsilon_\nu q$ als Unbekannte, so sind diese genau wie früher die ε_ν bestimmt und berechenbar. Mit ihrer Hilfe aber erhalten wir:

$$J_{\nu\mu} = \frac{\varepsilon_\mu - \varepsilon_\nu}{w_{\nu\mu}} = \frac{\varepsilon_\mu - \varepsilon_\nu}{l_{\nu\mu}\,\varrho}\, k_{\nu\mu}\, q = (\varepsilon_\mu q - \varepsilon_\nu q)\, \frac{k_{\nu\mu}}{l_{\nu\mu}\varrho}, \quad . \; . \quad (195)$$

eine Gleichung, in der alle Grössen der rechten Seite bekannt sind. **Die Stromverteilung ist also eindeutig bestimmt, sobald das Verhältnis der Querschnitte bekannt ist**, und damit ist die Berechnung geschlossener Leitungsnetze auf offene Leiter zurückgeführt.

112. Querschnittsberechnung geschlossener Netze auf Grund des günstigsten Speisungsbereichs. (Müllendorff.)

Die eben entwickelte Lösung befriedigt noch nicht vollkommen, denn sie enthält noch ein vorwiegend subjektives Moment, nämlich die Annahme der Querschnittsverhältnisse, wodurch eine gewisse Unsicherheit in die Rechnung hineingetragen wird. Wir können uns hiervon frei machen, wenn wir mit MÜLLENDORFF[1]) den Speisungsbereich jedes Speisepunktes so abgrenzen, dass das Kupfervolumen der Verteilungs- und Speiseleitungen zusammen ein Minimum wird.

Ist i_ν eine zwischen den Speisepunkten I und II liegende Belastung (Fig. 124), so wird bei gegebenem maximalen Spannungsverlust augenschein-

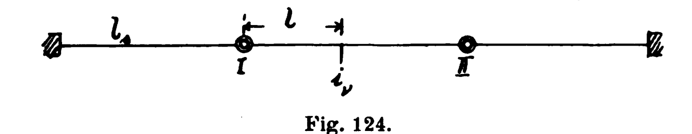


Fig. 124.

lich die geringste Kupfermenge benötigt, wenn der ganze Strom i_ν allein von der näheren Seite her geliefert wird, und zwar wird dann das Kupfervolumen:

$$V = \left(\frac{l_s^2}{\varepsilon_s} + \frac{l^2}{\varepsilon}\right) i_\nu\, \varrho.$$

Das Kupferminimum hängt also von dem Ausdruck

$$\frac{l_s^2}{\varepsilon_s} + \frac{l^2}{\varepsilon}$$

ab. Daraus folgt: Wir können jedem Speisepunkt ein bestimmtes Speisungsgebiet zuweisen, so dass jeder in ihm liegende Anschluss günstiger von diesem als von jedem anderen Speisepunkt gespeist wird. Zu diesem Zweck haben wir bei allen Belastungen den Ausdruck $\frac{l_s^2}{\varepsilon_s} + \frac{l^2}{\varepsilon}$ für alle möglichen Stromwege zu bilden und die Belastung demjenigen Speisepunkt zuzuweisen, der den geringsten Wert der Summe aufweist. Da diese Summe von der Belastung selbst unabhängig ist, so verfährt man am einfachsten in der Weise, dass man für jeden unmittelbaren Verbindungsweg zweier Speisepunkte oder für eine Gruppe solcher Verbindungswege die Grössen $\frac{l_s^2}{\varepsilon_s}$ bildet, also in

1) E. MÜLLENDORFF: Die rationelle Berechnung von Stromverteilungsnetzen. ETZ 1904, S. 295, und: Die Feststellung der natürlichen Aktionsgebiete der Speisepunkte ... Ebenda, S. 973.

dem einfachen Falle der Fig. 124 z. B. die Quotienten $\frac{l_I^2}{\varepsilon_s}$ und $\frac{l_{II}^2}{\varepsilon_s}$; deren Differenz giebt dann sofort diejenige Grösse $\frac{l^2}{\varepsilon} = \frac{l_I^2}{\varepsilon_s} - \frac{l_{II}^2}{\varepsilon_s}$, die zu dem kleineren Quotient, hier $\frac{l_{II}^2}{\varepsilon_s}$, hinzugefügt werden muss, ehe der andere Speisepunkt I zur Speisung herangezogen werden darf. Die Wurzel aus dem letzten Produkt, also die Länge $\lambda = \sqrt{\frac{l^2}{\varepsilon}}$ nennen wir den „vorläufigen Speisungsbereich" des betreffenden Speisepunktes. Für den Rest der Länge l_{II} kommen nun infolge der Gleichheit der Grössen $\frac{l_I^2}{\varepsilon_s}$ und $\frac{l_{II}^2}{\varepsilon_s} + \frac{l^2}{\varepsilon}$ beide Speisepunkte gleichmässig zur Wirkung, wir haben also nur die Länge

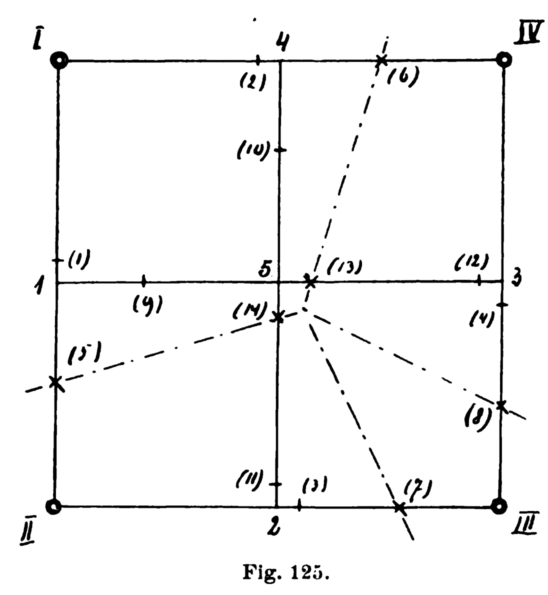


Fig. 125.

$l_{II} - \lambda$ zu halbieren und erhalten so die „wirksamen Speisebereiche" beider Speisepunkte.

Ein Beispiel wird am besten das skizzierte Verfahren erläutern. Gegeben sei ein Netz gemäss Fig. 125 mit quadratischen Maschen, deren Seiten je 100 m lang seien. Die Centrale soll 300 m links von I liegen, so dass die Speiseleiter die folgenden Längen haben:

$$l_I = 300, \quad l_{II} = l_{IV} = 500, \quad l_{III} = 700.$$

Ferner sei

$$\varepsilon_s = 10, \quad \varepsilon = 2 \text{ Volt}.$$

Dann wird

$$\frac{l_I^2}{\varepsilon_s} = 9000; \quad \frac{l_{II}^2}{\varepsilon_s} = \frac{l_{IV}^2}{\varepsilon_s} = 25000; \quad \frac{l_{III}^2}{\varepsilon_s} = 49000.$$

Für die Strecke $I\,1\,II$, $I\,4\,IV$ u. s. w. kommen nur zwei Speisepunkte, I und II, I und IV u. s. w. in Frage, also wird

$$\lambda_{I\,II} = \sqrt{\frac{25000 - 9000}{2}} = 89 \text{ m} = \lambda_{I\,IV}; \; \lambda_{II\,I} = \lambda_{IV\,I} = 0.$$

$$\lambda_{II\,III} = \lambda_{IV\,III} = \sqrt{\frac{24000}{2}} = 110 \text{ m}; \; \lambda_{III\,II} = \lambda_{III\,IV} = 0.$$

Wir erhalten so als vorläufige Speisungsbereiche in diesen Strecken die durch die Punkte (1), (2), (3) und (4) bezeichneten Grenzen und als Grenzen der wirksamen Speisebereiche die Halbierungspunkte von (1) *II*, (2) *IV*, (3) *III* und (4) *III*, nämlich die Punkte (5) bis (8). Für die übrigen Leitungswege, *I* 1 5 2 *III* u. s. w., kommen alle vier Speisepunkte in Frage. $\frac{l_{III}^2}{\varepsilon_s}$ besitzt den grössten Wert, also wird auch

$$\lambda_{III\,I} = 0,$$

während

$$\lambda_{I\,III} = \sqrt{20000} = 141$$

ist. Die Werte $\lambda_{II\,III}$ und $\lambda_{IV\,III}$ sind bereits berechnet. Wir erhalten so als Grenzen der vorläufigen Speisebereiche die Punkte (9) bis (12) und als Grenzen der wirksamen Speisebereiche die Halbierungspunkte von (9, 12) und (10, 11), also die Punkte (13) und (14). Damit sind die wirksamen Speisebereiche, wie sie in der Fig. 125 durch strichpunktierte Linien gekennzeichnet sind, festgelegt.

Das Minimum an Leitungskupfer würde man nun erhalten, wenn man die Leiter so berechnete, dass an den Speisebereichsgrenzen überall der grösste Spannungsverlust auftritt. Dies würde jedoch stets einen Querschnittswechsel innerhalb der von den Grenzen geschnittenen Knotenpunktsverbindungen bedingen, den man, wie bereits erwähnt, unter allen Umständen vermeidet. Man ist also zu einem Kompromiss genötigt und muss versuchen, sich den Grenzen des absoluten Kupferminimums zu nähern, ohne sie jedoch erreichen zu können. Das letzte Verfahren gestattet jedoch, das theoretische Kupferminimum eben unter Zugrundelegung des grössten Spannungsverlustes in allen Teilen zu berechnen. Ein Vergleich desselben mit dem wirklichen Kupferaufwand des Netzes lässt erkennen, ob die Bemessung desselben günstig gewählt ist oder durch Abänderungen verbessert werden muss.

Da man nun keinesfalls die berechneten genauen Querschnitte verlegen kann, so wird es bei grossen und komplizierten Netzen vielfach genügen, nur die Hauptwege bezw. einen Teil der möglichen Speisepunktsverbindungen nach diesem Verfahren zu teilen und die so erhaltenen Grenzpunkte zu verbinden, indem man die übrigen Strecken nach Gutdünken teilt. Ebenso ermittelt man nur für einzelne Strecken den vorläufigen Querschnitt und kann sich daraus leicht Anhaltspunkte schaffen, welche günstigsten Querschnittsverhältnisse in den verschiedenen Netzbereichen zu wählen sind. Eine solche Verbindung dieses Verfahrens mit dem ersten Berechnungsverfahren der Gleichungsmethode [111] ist also geeignet, die dieser anhaftende Unsicherheit zu beseitigen und rationelle Querschnittsbemessungen zu erhalten.

113. Die günstigste Lage der Speisepunkte.

Ferner bietet die Abgrenzung der Speisungsbereiche auf Grund der günstigsten Kupfermenge ein vortreffliches Kriterium für die Zweckmässigkeit der Lage der Speisepunkte. Es kann nämlich der Fall eintreten, dass ein nach den angegebenen Regeln abgegrenzter Speisebezirk überhaupt keine oder nur eine geringe Belastung besitzt. Das würde einfach bedeuten, dass der Speisepunkt überflüssig ist oder, falls die günstigste Gesamtzahl der Speisepunkte nach dem noch zu schildernden Verfahren [114 ff.] festgelegt ist, dass die Lage der Speisepunkte falsch gewählt ist. Man hätte also den Speisepunkt ganz zu entfernen oder zu verlegen. Ebenso würde eine grosse

Ungleichheit der Speisebereiche die Notwendigkeit einer anderen Gruppierung der Speisepunkte andeuten; man wird stets danach zu streben haben, die Speisebezirke bezw. deren Belastung möglichst gleich gross zu machen. Sind schliesslich die an den Grenzen der Speisebezirke zusammenstossenden, für den grössten Spannungsverlust berechneten Leiterquerschnitte gleich oder nahezu gleich, so wird man sie ohne weiteres zusammenschliessen können, indem man für die ganze Strecke den nächstliegenden Normalquerschnitt wählt. Auch wenn der schliesslich verlegte Querschnitt von dem berechneten abweicht, wird in diesem Falle eine Änderung der Stromverteilung nicht eintreten. Sind dagegen diese Querschnitte sehr verschieden, und wählt man etwa einen mittleren Normalquerschnitt für die ganze Strecke, so würde man dadurch die Speisepunkte zur Stromlieferung in fremde Gebiete zwingen, also eine ungünstige Stromverteilung herbeiführen. Auch dies würde andeuten, dass die Lage der Speisepunkte günstiger zu gestalten ist.

Wie man sieht, ist die Querschnittsbemessung eines Netzes nicht eine ausschliesslich mathematische Aufgabe, sie kann überhaupt nicht auf nur rechnerischem Wege gelöst werden, sondern es ist vielfaches Tasten und Ändern erforderlich, um die günstigsten Verhältnisse zu erhalten. Der Geübte freilich wird eben auf Grund seiner Erfahrung oft ohne viele Rechnungen die Bemessung der Querschnitte vornehmen können, aber diese Erfahrung hat er nur durch viele Berechnungen erwerben können.

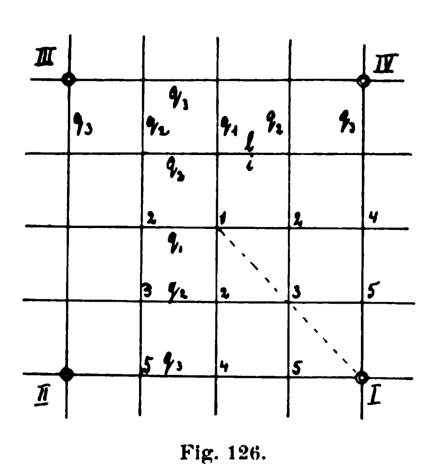


Fig. 126.

Beispiel.

Als Beispiel einer Querschnittsberechnung bei gegebener Zahl und Lage der Speisepunkte wollen wir hier ein Netz berechnen, das aus lauter Quadraten besteht, und zwar soll der in der Fig. 126 gezeichnete Bezirk einen Teil eines vollständig regelmässig angelegten Netzes darstellen, in dem die Entfernung der Speisepunkte vier Seitenlängen beträgt. Die Länge jeder Seite soll l Meter, die Belastung derselben i Amp. betragen und gleichmässig über die ganze Länge verteilt sein. Die Querschnitte der horizontalen und vertikalen Leiter sind konstant vorausgesetzt, und zwar sollen die Querschnitte aufeinander folgender horizontaler und vertikaler Strecken sich verhalten wie

$$\frac{1}{k_3} : \frac{1}{k_2} : \frac{1}{k_1},$$

also

$$k_3\, q_3 = k_2\, q_2 = k_1\, q_1 = q$$

sein.

Hier ist zunächst klar, dass die Stromverteilung sich vollkommen symmetrisch gestalten muss; sowohl die mittleren Strecken vom Querschnitt q_1 als auch die Diagonalen des von vier Speisepunkten gebildeten Quadrats sind Symmetrieachsen, da ja die Querschnitte zu beiden Seiten derselben gleich sind. Die Ströme in ähnlich gelegenen Seiten und die Spannungsverluste in ähnlich gelegenen Knotenpunkten sind daher gleich, und wir er-

halten die in der Fig. 126 dargestellte Knotenpunktsbezifferung, aus der hervorgeht, dass wir fünf Unbekannte $\varepsilon_1 q$ bis $\varepsilon_5 q$ haben, die uns die folgenden fünf Gleichungen liefern:

$$\frac{4}{k_1}\varepsilon_1 q - \frac{4}{k_1}\varepsilon_2 q = 2 i l \varrho$$

$$-\frac{1}{k_1}\varepsilon_1 q + 2\left(\frac{1}{k_1}+\frac{1}{k_2}\right)\varepsilon_2 q - \frac{2}{k_2}\varepsilon_3 q - \frac{1}{k_1}\varepsilon_4 q = 2 i l \varrho$$

$$-\frac{2}{k_2}\varepsilon_2 q + \frac{4}{k_2}\varepsilon_3 q - \frac{2}{k_2}\varepsilon_5 q = 2 i l \varrho$$

$$-\frac{2}{k_1}\varepsilon_2 q + 2\left(\frac{1}{k_1}+\frac{1}{k_3}\right)\varepsilon_4 q - \frac{2}{k_3}\varepsilon_5 q = 2 i l \varrho$$

$$-\frac{2}{k_2}\varepsilon_3 q - \frac{1}{k_3}\varepsilon_4 q + 2\left(\frac{1}{k_2}+\frac{1}{k_3}\right)\varepsilon_5 q = 2 i l \varrho.$$

Die Lösung derselben ergiebt:

$$\varepsilon_5 q = 7{\cdot}5\, k_3 i l \varrho$$

$$\varepsilon_4 q = \frac{8{\cdot}5\, k_1 k_3 + 12\, k_2 k_3 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, i l \varrho$$

$$\varepsilon_3 q = \frac{2{\cdot}25\, k_1 k_2 + 7{\cdot}5\, k_1 k_3 + 10{\cdot}25\, k_2 k_3 + 0{\cdot}5\, k_2^2 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, i l \varrho$$

$$\varepsilon_2 q = \frac{3{\cdot}5\, k_1 k_2 + 7{\cdot}5\, k_1 k_3 + 12\, k_2 k_3 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, i l \varrho$$

$$\varepsilon_1 q = \frac{4\, k_1 k_2 + 8\, k_1 k_3 + 12\, k_2 k_3 + 0{\cdot}5\, k_1^2 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, i l \varrho.$$

Da nun ε_1 der grösste Spannungsverlust ist und den Wert ε annehmen soll, so wird

$$q = \frac{4\, k_1 k_2 + 8\, k_1 k_3 + 12\, k_2 k_3 + 0{\cdot}5\, k_1^2 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, \frac{i l \varrho}{\varepsilon}.$$

Für durchgehend gleiche Querschnitte, also für $k_3 = k_2 = k_1$, wird

$$q = \frac{32}{3}\,\frac{i l \varrho}{\varepsilon}.$$

Verhalten sich die aufeinander folgenden Querschnitte wie

$$1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{4},$$

ist also

$$k_3 = 1, \quad k_2 = 2, \quad k_1 = 4,$$

so wird

$$q = q_3 = 14{\cdot}8\,\frac{i l \varrho}{\varepsilon}, \quad q_2 = 7{\cdot}4\,\frac{i l \varrho}{\varepsilon}, \quad q_1 = 3{\cdot}7\,\frac{i l \varrho}{\varepsilon}.$$

114. Die günstigste Zahl der Speisepunkte. (Sengel.)

In ihrer ganzen Allgemeinheit für beliebig gestaltete Netze lässt sich die Aufgabe, die günstigste Zahl und Lage der Speisepunkte zu bestimmen, mathematisch nicht angreifen, und man wäre daher auf Vergleichsrechnungen angewiesen, d. h. man hätte das Netz für eine Reihe von Speisepunktzahlen

zu berechnen und diejenige Anzahl zu wählen, die den geringsten Kostenaufwand erfordert. Vergleichende Rechnungen, die A. SENGEL[1]) an verschiedenen, für die mathematische Behandlung besonders günstig gestalteten Netzen angestellt hat, haben jedoch Formeln für die Ermittelung der günstigsten Speisepunktzahl gezeitigt, die für die verschiedenen behandelten Netzformen eine so gute Übereinstimmung zeigen, dass ihre Anwendung auch auf beliebig gestaltete Netze gerechtfertigt erscheint.

SENGEL unterzog Netze der Rechnung, die aus lauter regulären Figuren zusammengesetzt waren, nämlich aus Quadraten, Dreiecken und Sechsecken (s. Fig. 127 bis 129), deren Seiten gleichmässig belastet sind. Wir wollen, um das Verfahren zu erläutern, die Berechnung der ersten dieser Netzformen durchführen, indem wir die Gesamtkosten abhängig von der Speisepunktzahl oder einer anderen mit dieser zusammenhängenden unabhängigen Veränderlichen aufstellen. Wir setzen dann in bekannter Weise den Differential-

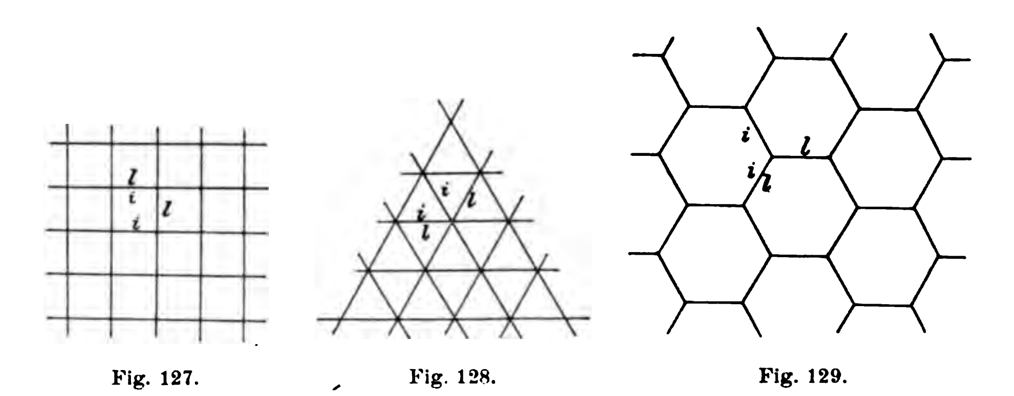


Fig. 127. Fig. 128. Fig. 129.

quotient dieses Ausdruckes nach der Unabhängigen gleich Null und erhalten so die Gleichung für den gesuchten günstigsten Wert.

Die Betrachtungen können ganz allgemein, ohne Rücksicht auf die Stromart (Gleich-, Wechsel-, Drehstrom) und ohne Rücksicht auf die Netzanordnung (Zwei- oder Mehrleiternetz) durchgeführt werden, wenn man die zu liefernde Energie in der Form

$$\mathfrak{e} = i E \zeta$$

schreibt. Bezüglich des Spannungsverlustes ist zu berücksichtigen, dass, wenn ε seinen grössten Wert bedeutet, bei Wechselstromlinien der Spannungsabfall $\frac{\varepsilon}{\cos\varphi}$ betragen darf [108], wobei φ die mittlere Phasenverschiebung von Strom und Spannung gegen Null ($\mathfrak{E}$) bedeutet. Setzen wir also allgemein für den maximal zulässigen Spannungsabfall

$$\frac{\varepsilon}{\cos\varphi} = \frac{p}{\cos\varphi}\,\mathfrak{E},$$

1) A. SENGEL: Bestimmung der günstigsten Zahl von Speisepunkten eines Netzes. ETZ 1899, S. 807. Vgl. auch R. HAAS: Über die günstigste Verteilung der Speisepunkte längs einer einzigen Verteilungsleitung. ETZ 1896, S. 130, und J. TEICHMÜLLER: Elektrische Leitungen.

so wird bei Gleichstrom

$$\zeta = 1, \quad \mathfrak{E} = \frac{1}{2} E \quad \text{und} \quad \cos\varphi = 1,$$

bei Wechselstrom

$$\zeta = \cos\varphi, \quad \mathfrak{E} = \frac{1}{2} E$$

und bei Drehstrom

$$\zeta = \sqrt{3} \cdot \cos\varphi \quad \text{und} \quad \mathfrak{E} = \frac{1}{\sqrt{3}} E.$$

Ferner können wir alle auf die Bildung des Kupfervolumens oder der Leitungskosten bezüglichen Operationen auf einen Leiter beschränken. Denn die Mittelleiter werden bei Mehrleitersystemen allgemein nicht in die Speisekästen eingeführt (weil sie gemäss den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker nicht gesichert werden dürfen), sondern zu einem besonderen Mittelleiternetz vereinigt; das Gesamtvolumen bezw. die Gesamtkosten unterscheiden sich also von den entsprechenden Werten eines Leiters nur durch einen konstanten Faktor, der bei der Differentiation verschwindet, da ja der Differentialquotient gleich Null gesetzt wird.

115. Fortsetzung. Bezeichnungen.

Für alle aus regulären Polygonen bestehenden Netzformen sei l die Länge einer Polygonseite, i deren Belastung in Ampere. Ferner wollen wir die für das Verteilungsnetz gültigen Bezeichnungen ohne Index, die gleichen Grössen des Speisenetzes mit dem Index s schreiben. Wir bezeichnen hier mit

N die Gesamtzahl der Speisepunkte,

S die Gesamtzahl aller Polygonseiten des Netzes,

l_1 die gerade Entfernung zweier Speisepunkte in Metern,

$n_1 = \frac{S}{N}$ die auf einen Speisepunkt entfallende Zahl der Polygonseiten,

n die Anzahl der zwischen zwei Speisepunkten liegenden Polygonseiten,

V das gesamte auf einen Speisepunkt entfallende Kupfervolumen des Verteilungsnetzes, also

V_s das Kupfervolumen einer Speiseleitung, beide bezogen auf die einfache Länge des Leiters, in cm^3,

$\mathfrak{E}$ die gesamte vom Netz zu liefernde Energie in Watt,

$\mathfrak{e} = iE\zeta$ die auf eine Polygonseite entfallende Energie in Watt,

$\sigma = \frac{\mathfrak{E}}{O}$ die Flächendichte der Belastung in $Watt/m^2$,

O die vom Netz bedeckte Fläche in Quadratmetern.

116. Fortsetzung. Die Netzkosten.

Wir können zunächst allgemein l_1 und n_1 als Funktionen von l und n ausdrücken, da ja in der Praxis die Speisepunkte stets in einen Kreuzungspunkt des Netzes gelegt werden. Wir können also schreiben:

$$l_1 = \varphi(ln); \quad n_1 = f(n) \quad \ldots\ldots \quad (196)$$

Daher wird

$$\left.\begin{aligned} N &= \frac{S}{f(n)} \\ \mathfrak{E} &= S\mathfrak{e} \\ \mathfrak{e} &= \zeta i E = \zeta \beta l^2 \sigma, \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (197)$$

wobei β ein von der Netzanordnung abhängiger Zahlenfaktor ist. Hieraus folgt:

und

$$\left.\begin{aligned} S &= \frac{\mathfrak{E}}{\zeta\beta l^2\sigma} \\ N &= \frac{\mathfrak{E}}{\zeta i E f(n)} = \frac{\mathfrak{E}}{\zeta\beta l^2\sigma f(n)} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (198)$$

N und l_1 bilden die unabhängigen Veränderlichen, die beide durch die Gleichungen (196) und (198) mit l zusammenhängen. Wählen wir l als Veränderliche, so haben wir nunmehr die Netzkosten in Abhängigkeit von l aufzustellen.

Bezeichnen wir mit a einen von der Netzanordnung und n abhängigen Zahlenwert, so können wir setzen:

$$V = a\,\frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon}\cos\varphi = a\,\frac{i l^2 \varrho}{p E}\cos\varphi.$$

Ist weiterhin c der Preis eines Kilogramms Kupfer in Mark, γ das spezifische Gewicht des Kupfers, so erhalten wir zunächst für blanke Kupferleitungen als Kosten des Verteilungsnetzes, bezogen auf die einfache Leiterlänge:

$$K_v = \frac{V\gamma c}{1000}\,N = a\,\frac{i l^2\varrho}{pE}\cos\varphi\cdot\frac{\gamma c}{1000}\,\frac{\mathfrak{E}}{\zeta i E f(n)}$$

oder, wenn alle Materialkonstanten des Leiters zusammengefasst werden, indem

$$C = \frac{\varrho\gamma c}{1000}$$

gesetzt wird:

$$K_v = C\,\frac{\mathfrak{E}}{E E}\cdot\frac{l^2 a}{p f(n)}\cdot\frac{\cos\varphi}{\zeta}.$$

Bezeichnet ferner m die Kosten der Verlegung eines Meters Draht, einschliesslich Isolatoren, so betragen die gesamten Montagekosten des Verteilungsnetzes

$$M_v = S l m = \frac{\mathfrak{E} m}{\zeta\beta l \sigma}.$$

Die Kosten für den Kupferaufwand und die Montage der Speiseleiter erhalten wir auf gleichem Wege zu

$$K_s = C\,\frac{\mathfrak{E} l_s^2}{\varepsilon_s E}\,\frac{\cos\varphi}{\zeta}$$

$$M_s = N l_s m = \frac{\mathfrak{E} l_s m}{\zeta\beta l^2\sigma f(n)}.$$

Bezeichnet schliesslich s die Kosten eines Speisepunktes, einschliesslich des Anschlusses der Speiseleitung in der Centrale, so betragen diese Kosten, bezogen auf einen Speiseleiter:

$$P = \frac{N s}{\xi} = \frac{\mathfrak{E} s}{\xi\zeta\beta l^2\sigma f(n)},$$

wobei ξ für Gleich- und Wechselstrom den Wert 2, für Drehstrom den Wert 3 annimmt. Die gesamten Netzkosten sind also:

$$\left.\begin{aligned} K = C\,\frac{\mathfrak{E}\,l_s^2}{\varepsilon_s\,E}\,\frac{\cos\varphi}{\zeta} + \frac{\mathfrak{E}\,l_s\,m}{\zeta\beta\,l^2\sigma f(n)} + \frac{\mathfrak{E}\,s}{\xi\zeta\beta\,l^2\sigma f(n)} \\ + C\,\frac{\mathfrak{E}\,l^2\alpha}{\mathcal{E}\,E\,p\,f(n)}\,\frac{\cos\varphi}{\zeta} + \frac{\mathfrak{E}\,m}{\zeta\beta\,l\,\sigma} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \quad (199)$$

Der erste Summand ist von l vollständig unabhängig und auch der letzte ist nur scheinbar von l abhängig, da für eine gegebene Belastung, also für eine gegebene Netzanordnung die Verlegungskosten von der Zahl der Speisepunkte unabhängig sind. Die übrigen drei Glieder enthalten ausser der Veränderlichen l noch die von der Netzform und n abhängigen Grössen α, β und $f(n)$; es wird sich jedoch zeigen, dass diese im Ergebnis nur in einer Verbindung erscheinen, die von l, n und der Netzform unabhängig ist. Sehen wir sie demnach als Konstanten an, so erhalten wir aus

$$\frac{dK}{dl} = -\frac{2\,\mathfrak{E}\,l_s\,m}{\zeta\beta\,l^3\sigma f(n)} - \frac{2\,\mathfrak{E}\,s}{\xi\zeta\beta\,l^3\sigma f(n)} + \frac{2\,C\,\mathfrak{E}\,l\,\alpha}{\mathcal{E}\,E\,p\,f(n)}\,\frac{\cos\varphi}{\zeta} = 0$$

als wirtschaftliche Leiterlänge:

$$l_w = \sqrt[4]{\frac{(l_s\,m + s/\xi)\,p\,\mathcal{E}\,E}{C\,\alpha\,\beta\,\sigma\cos\varphi}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (200)$$

und vermittelst der Gleichung (197) die günstigste Zahl der Speisepunkte:

$$N_w = \frac{\mathfrak{E}}{\zeta f(n)}\sqrt{\frac{C\,\alpha\cos\varphi}{(l_s\,m + s/\xi)\,p\,\beta\,\sigma\,\mathcal{E}\,E}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (201)$$

In dieser Gleichung erscheinen die Grössen α, β und $f(n)$ in der Form

$$\frac{1}{f(n)}\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}.$$

Es ist also noch zu zeigen, dass diese Grösse von der Netzanordnung und von l unabhängig ist.

117. Fortsetzung. Quadratische Netzelemente.

Wollen wir die Grössen $f(n)$, α und β, sowie n_1 und V ermitteln, so ist für Quadrate als Netzelemente

$$l_1 = \varphi(nl) = nl = n\sqrt[4]{\frac{(l_s\,m + s/\xi)\,p\,\mathcal{E}\,E}{C\,\alpha\,\beta\,\sigma\cos\varphi}} \quad . \; . \; . \; . \quad (202)$$

Hier erscheinen die Werte n, α und β in der Verbindung

$$n\sqrt[4]{\frac{1}{\alpha\beta}}.$$

Auch dieser Wert ist, wie gezeigt werden soll, konstant. Ferner ist

$$n_1 = f(n) = 2\,n^2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (203)$$

Denn zwischen vier Speisepunkten liegen n^2 Quadrate, also kommen auf jeden Speisepunkt einseitig $\frac{n^2}{4}$ Quadrate mit n^2 Seiten, von denen aber jede Seite zwei Quadraten gleichzeitig angehört. Da sich in einem Kreuzungs- bezw. Speisepunkt vier Bezirke treffen, so gehören zu ihm viermal soviel Seiten, also

$$n_1 = 4\,\frac{n^2}{2} = 2\,n^2.$$

Ferner ist die auf eine Polygonseite entfallende Leistung

$$\mathfrak{e} = \zeta i E = \frac{1}{2} \zeta l^2 \sigma, \quad \ldots \ldots \quad (204)$$

denn auf einen Speisepunkt kommt die Fläche $4 \frac{n^2}{4} l^2$ Quadratmeter, also beträgt die Leistung, unter Berücksichtigung von Gleichung (203):

$$n^2 l^2 \sigma = n_1 i E = 2 n^2 i E,$$

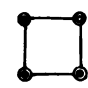


Fig. 130.

woraus sich der Wert für $\mathfrak{e}$ ergiebt. Der Vergleich von (204) mit (197) ergiebt $\beta = 0{\cdot}5$ und wir erhalten für

1. $n = 1$ (Fig. 130), d. h. wenn die Seitenlänge l gleich oder nahezu gleich l_w ist, so dass jeder Kreuzungspunkt ein Speisepunkt wird:

$$f(n) = n_1 = 2$$

und nach Gleichung (XXIV) [**64**]:

$$q = 0{\cdot}125 \frac{i l \varrho}{\varepsilon};$$

daher:

$$V = 2 q l = 0{\cdot}25 \frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon},$$

mithin:

$$a = 0{\cdot}25.$$

2. $n = 2$ (Fig. 131):

$$f(n) = n_1 = 8.$$

Jetzt verzweigen sich die Leitungen, sie können also entweder alle den gleichen Querschnitt erhalten oder zur Erzielung der geringsten Kupfermenge verschiedene Querschnitte, wobei entsprechend den praktischen Verhältnissen die unverzweigten Leiter durchgehend denselben Querschnitt beibehalten. Für den letzten Fall beschränken wir die Untersuchung auf die Annahme, dass die aufeinander folgenden Querschnitte sich wie 1 : 2 verhalten. Dann wird, wenn wir allgemein

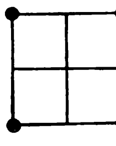


Fig. 131.

$$k_1 q_1 = k_2 q_2 = q$$

setzen (siehe das Beispiel [**113**], S. 200):

$$\varepsilon_2 q = \frac{3 k_2}{2} i l \varrho; \quad \varepsilon_1 q = \varepsilon q = \left(\frac{3 k_2}{2} + \frac{k_1}{2}\right) i l \varrho.$$

Für $k_2 = k_1$ wird also:

$$V = 8 q l = 16 \frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon}; \quad a = 16,$$

und für $k_2 = 1$, $k_1 = 2$, also für $q_2 = 2 q_1$:

$$V_{min} = (4 q_2 + 4 q_1) l = 15 \frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon}; \quad a_{min} = 15.$$

Das theoretische Kupferminimum ergiebt sich zu $14{\cdot}9\,\frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon}$ für $q_2 = 1{\cdot}72\, q_1$.

3. $n = 3$ (Fig. 132):

$$f(n) = n_1 = 18.$$

$$\varepsilon_2 q = 4 k_2\, i l \varrho; \quad \varepsilon_1 q = (4 k_2 + k_1)\, i l \varrho; \quad \varepsilon q = (4 k_2 + 1{\cdot}125 k_1)\, i l \varrho.$$

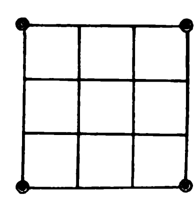


Fig. 132.

Für $q_2 = q_1$:

$$V = 92{\cdot}25\,\frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon}; \quad a = 92{\cdot}25.$$

Für $q_2 = 2 q_1$:

$$V_{min} = 78{\cdot}0\,\frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon}; \quad a_{min} = 78{\cdot}0.$$

Das theoretische Minimum wird zu $73{\cdot}5\,\frac{i l^2 \varrho}{\varepsilon}$ für $q_2 = 2{\cdot}67\, q_1$ erhalten.

4. $n = 4$ (Fig. 133).

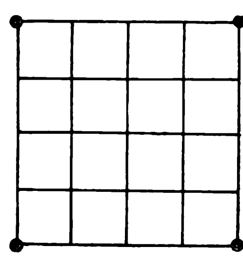


Fig. 133.

Entsprechend dem auf S. 200 berechneten Beispiel ist:

$$f(n) = n_1 = 32.$$

$$\varepsilon_5 q = 7{\cdot}5\, k_3\, i l \varrho,$$

$$\varepsilon_4 q = \frac{8{\cdot}5\, k_1 k_3 + 12\, k_2 k_3 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, i l \varrho,$$

$$\varepsilon_3 q = \frac{2{\cdot}25\, k_1 k_2 + 7{\cdot}5\, k_1 k_3 + 10{\cdot}25\, k_2 k_3 + 0{\cdot}5\, k_2^2 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, i l \varrho,$$

$$\varepsilon_2 q = \frac{3{\cdot}5\, k_1 k_2 + 7{\cdot}5\, k_1 k_3 + 12\, k_2 k_3 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, i l \varrho,$$

$$\varepsilon_1 q = \varepsilon q = \frac{4\, k_1 k_2 + 8\, k_1 k_3 + 12\, k_2 k_3 + 0{\cdot}5\, k_1^2 + 7{\cdot}5\, k_3^2}{k_1 + k_2 + k_3}\, i l \varrho.$$

Für $q_3 = q_2 = q_1$ wird

$$a = 341{\cdot}3;$$

für $q_3 = 2 q_2 = 4 q_1$:

$$a_{min} = 266{\cdot}4.$$

5. $n = 5$ (Fig. 134).

$$f(n) = n_1 = 50.$$

$$\varepsilon_5 q = 12 k_3 i l \varrho.$$

$$\varepsilon_4 q = \frac{14 k_1 k_3 + 42 k_2 k_3 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l \varrho,$$

$$\varepsilon_3 q = \frac{4 k_1 k_2 + 12 k_1 k_3 + 34 k_2 k_3 + k_2^2 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l \varrho,$$

$$\varepsilon_2 q = \frac{7 k_1 k_2 + 12 k_1 k_3 + 42 k_2 k_3 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l \varrho,$$

$$\varepsilon_1 q = \frac{9 k_1 k_2 + 14 k_1 k_3 + 42 k_2 k_3 + k_1^2 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l \varrho,$$

$$\varepsilon q = \frac{9{\cdot}25 k_1 k_2 + 14{\cdot}25 k_1 k_3 + 42 k_2 k_3 + 1{\cdot}125 k_1^2 + 24 k_3^2}{k_1 + 2 k_2 + 2 k_3} i l \varrho.$$

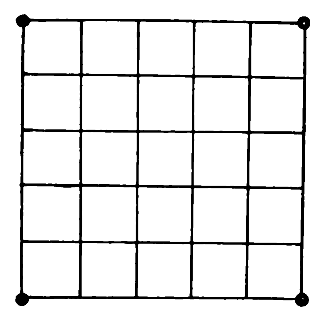


Fig. 134.

Für $q_3 = q_2 = q_1$ wird

$$a = 905;$$

für $q_3 = 2 q_2 = 4 q_1$:

$$a_{min} = 610.$$

Wir erhalten also für

$n =$	1	2	3	4	5
$a_{min} =$	0·25	15·0	78·0	266·5	610·0
$\frac{1}{f(n)} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} =$	0·354	0·686	0·695	0·723	0·700
$n \sqrt[4]{\frac{1}{\alpha \beta}} =$	1·68	1·21	1·20	1·18	1·19

Für $n > 1$, also für Netze mit Maschen bezw. Stromverzweigungen, sind in der That die beiden Zahlenreihen mit genügender Annäherung konstant, d. h. die günstigste Zahl der Speisepunkte bezw. ihre Entfernung ist von der Zahl der Maschen unabhängig. Dagegen weichen die Werte für $n = 1$, also für Netze, deren sämtliche Kreuzungspunkte Speisepunkte sind, wesentlich von den für Netze mit Maschen geltenden Zahlen ab. Bilden wir aus den Zahlenreihen unter $n = 2$ bis 5 die Mittelwerte, so können wir, unter Voraussetzung abgestufter Querschnitte an Stelle der Gleichungen (201) und (202) schreiben:

$$\left.\begin{aligned} N_w &= \begin{matrix}0{\cdot}35\\0{\cdot}70\end{matrix}\Bigg\} \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C\cos\varphi}{(l_s m + s/\xi)\,\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_{1w} &= \begin{matrix}1{\cdot}7\\1{\cdot}2\end{matrix}\Bigg\} \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi)\,p \mathcal{E} E}{C\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (205)$$

Hierbei gelten die oberen Zahlenwerte für Netze ohne Verzweigung, die unteren für verzweigte Netze.

Für durchgehend gleiche Querschnitte ergiebt sich ebenso:

$$\left.\begin{aligned} N &= 0{\cdot}78\ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{C\cos\varphi}{(l_s m + s/\xi)\,\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_1 &= 1{\cdot}1\ \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi)\,p \mathcal{E} E}{C\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (205\text{a})$$

Die günstigste Zahl der Speisepunkte wird also, abgesehen von den Materialkonstanten, nur durch die Belastung ($\mathfrak{E}$, E, σ), den Spannungsverlust ($p\mathcal{E}$) und die Länge der Speiseleiter (l_s) bestimmt. Sie wächst umgekehrt proportional mit der Betriebsspannung E, und bei konstanter Betriebsspannung umgekehrt proportional mit der Wurzel aus dem Spannungsverlust ε; sie nimmt ferner bei gleicher Netzfläche in geradem Verhältnis mit der Wurzel aus der Leistung des Netzes zu, da ja

$$\sqrt{\frac{\mathfrak{E}^2}{\sigma}} = \sqrt{\mathfrak{E}\,O},$$

oder auch mit der Wurzel aus der Belastungsdichte, da

$$\sqrt{\frac{\mathfrak{E}^2}{\sigma}} = O\,\sqrt{\sigma}.$$

Bei gleicher Belastungsdichte dagegen wächst N proportional mit $\mathfrak{E}$ bezw. O. Je grösser schliesslich die Entfernung der Centrale vom Netz (l_s), um so kleiner wird N_w. Entsprechend wächst die günstigste Entfernung der Speisepunkte mit der Wurzel aus der Betriebsspannung bezw. bei gleicher Spannung mit der vierten Wurzel aus dem Spannungsverlust und angenähert mit der vierten Wurzel aus l_s; sie nimmt ab mit zunehmender Belastungsdichte, und zwar ebenfalls mit der vierten Wurzel.

118. Fortsetzung. Andere Netzformen.

Auch bei Zugrundelegung von gleichseitigen Dreiecken und Sechsecken als Netzelemente zeigt die Rechnung,[1]) dass die Grössen

$$\frac{1}{f(n)}\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad \text{und} \quad n\sqrt[4]{\frac{1}{\alpha\beta}}$$

für verzweigte Netze praktisch konstant sind. Die entsprechenden Formeln lauten:

1) Siehe ETZ 1899, S. 809 ff.

Für gleichseitige Dreiecke bei abgestuften Querschnitten

$$\left.\begin{aligned} N_w &= \begin{matrix}0{\cdot}38\\0{\cdot}65\end{matrix}\Big\}\ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta}\sqrt{\frac{C\cos\varphi}{(l_s m + s/\xi)\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_{1w} &= \begin{matrix}1{\cdot}7\\1{\cdot}3\end{matrix}\Big\}\ \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi) p \mathcal{E} E}{C\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (206)$$

und bei durchgehend gleichen Querschnitten

$$\left.\begin{aligned} N &= 0{\cdot}78\ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta}\sqrt{\frac{C\cos\varphi}{(l_s m + s/\xi)\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_1 &= 1{\cdot}2\ \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi) p \mathcal{E} E}{C\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (206\,\mathrm{a})$$

Für Sechsecke bei abgestuften Querschnitten

$$\left.\begin{aligned} N_w &= \begin{matrix}0{\cdot}38\\0{\cdot}63\end{matrix}\Big\}\ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta}\sqrt{\frac{C\cos\varphi}{(l_s m + s/\xi)\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_{1w} &= \begin{matrix}1{\cdot}6\\1{\cdot}2\end{matrix}\Big\}\ \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi) p \mathcal{E} E}{C\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (207)$$

und bei durchgehend gleichen Querschnitten

$$\left.\begin{aligned} N &= 0{\cdot}68\ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta}\sqrt{\frac{C\cos\varphi}{(l_s m + s/\xi)\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_1 &= 1{\cdot}1\ \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi) p \mathcal{E} E}{C\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (207\,\mathrm{a})$$

119. Fortsetzung. Die günstigste Zahl der Speisepunkte bei Netzen ohne Transformatoren.

Wie aus den Gleichungen (205) bis (207) ersichtlich ist, hängt die Zahl der Speisepunkte bezw. ihre Entfernung überhaupt nicht von der Form des Netzes ab, da die Konstanten sowohl für die verschiedenen betrachteten Netzelemente als auch für abgestufte und durchgehend gleiche Querschnitte nur unwesentliche Abweichungen zeigen. Auch Rechnungen SENGELS mit anderen Netzformen bestätigen dies Ergebnis. Bildet man daher aus allen zusammengehörigen Konstanten das Mittel, so folgt allgemein für alle Netze mit Luftleitungen:

$$\left.\begin{aligned} N_w &= \begin{matrix}0{\cdot}37\\0{\cdot}71\end{matrix}\Big\}\ \frac{\mathfrak{E}}{\zeta}\sqrt{\frac{C\cos\varphi}{(l_s m + s/\xi)\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_{1w} &= \begin{matrix}1{\cdot}7\\1{\cdot}2\end{matrix}\Big\}\ \sqrt[4]{\frac{(l_s m + s/\xi) p \mathcal{E} E}{C\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \quad (208)$$

oder wenn wir zur grösseren Bequemlichkeit die Konstante für verzweigte Netze auf 1·0 festsetzen und daher die entsprechenden Quotienten unter das Wurzelzeichen bringen:

$$\left.\begin{aligned} N_w &= \begin{matrix}0{\cdot}5\\1{\cdot}0\end{matrix}\Big\} \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \cdot \sqrt{\frac{0{\cdot}5\, C \cos\varphi}{(l_e m + s/\xi)\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_{1w} &= \begin{matrix}1{\cdot}4\\1{\cdot}0\end{matrix}\Big\} \sqrt[4]{\frac{(l_e m + s/\xi) p \mathcal{E} E}{0{\cdot}5\, C \sigma \cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; (\text{XXXIII})$$

wobei

$$C = \frac{\gamma c \varrho}{1000}.$$

Ist das Netz unter der Erde verlegt, so können wir, wie wir bereits wissen [15], den Preis eines Meters Kabel in der Form $a + bq$ schreiben. Dagegen kostet ein Meter Freileitung vom Querschnitt q

$$\frac{\gamma c}{1000} q = \frac{C}{\varrho} q \text{ Mark.}$$

An Stelle von C ist also nunmehr $b\varrho$ zu setzen, während die Konstante a zu m hinzuzufügen ist, da sie die Kosten ebenso beeinflusst, wie die Montagekosten, nämlich proportional zur Leitungslänge. Wir erhalten demnach für Kabelnetze ohne Transformatoren die Formeln:

$$\left.\begin{aligned} N_w &= \begin{matrix}0{\cdot}5\\1{\cdot}0\end{matrix}\Big\} \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{0{\cdot}5\, b \varrho \cos\varphi}{[l_e(m+a) + s/\xi]\sigma p \mathcal{E} E}} \\ l_{1w} &= \begin{matrix}1{\cdot}4\\1{\cdot}0\end{matrix}\Big\} \sqrt[4]{\frac{[l_e(m+a) + s/\xi] p \mathcal{E} E}{0{\cdot}5\, b \varrho \sigma \cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; (\text{XXXIV})$$

Ebenso wie m beziehen sich die Werte von a und b auf einen Leiter; sie können also der Tabelle II, S. 20, entnommen werden. Die Kosten der Kabelgräben sind ebenso wie die Kosten für das Leitungsgestänge bei Freileitungen unabhängig von der Zahl der Speisepunkte und treten daher in der Formel nicht auf. Ebensowenig ändern sich die Gleichungen, wenn beide Strassenseiten mit Kabeln zu belegen sind, da ja der gesamte Kupferquerschnitt der gleiche bleibt wie bei einseitiger Verlegung.

120. Fortsetzung. Netze mit Transformatoren.

Wird der Strom, wie gewöhnlich bei Wechsel- und Drehstromnetzen, transformiert, so treten an die Stelle der Speisepunkte die Transformatoren. Für das Hochspannungsnetz gelten die Formeln (XXXIII) und (XXXIV) unmittelbar; denn die Transformatoren beeinflussen die Kosten desselben ebensowenig wie die Einzellasten die Kosten des Niederspannungsnetzes beeinflussen; sie werden unmittelbar oder durch kurze Verbindungsleitungen an die Hochspannungskabel angeschlossen. Dagegen sind die Kosten der Transformatoren mit Einschluss der Kosten der eben erwähnten Verbindungsleitungen, der Transformatorstationen und ihrer Aufstellung für das Niederspannungsnetz zu berücksichtigen, da sie ja die Speiseleitungen und Speisekästen ersetzen.

Den Preis eines Transformators kann man nun gleichfalls mit grosser Annäherung in der Form $f + g\mathfrak{A}$ schreiben, wenn $\mathfrak{A}$ die Leistung des Transformators in KW, f und g Konstanten sind. Die Montagekosten des Transformators, einschliesslich der Transformatorenstation und Schaltanlage, sind von der Grösse desselben ziemlich unabhängig und seien mit h bezeichnet. Das Produkt $N\dfrac{f + h + g\mathfrak{A}}{\xi}$ tritt also an die Stelle der ersten drei Summanden der Gleichung (199) [116] für die Netzkosten K, und da $Ng\mathfrak{A} = g\mathfrak{E}$ unter den für den Preis der Transformatoren gemachten Voraussetzungen von der

Zahl der Transformatoren, also von N bezw. l_1 unabhängig ist, mithin bei der Differentiation verschwindet, so ist in den Gleichungen (XXXIII) und (XXXIV) $\frac{f+h}{\xi}$ anstatt $l_s m + s/\xi$ bezw. $l_s(m+a) + s/\xi$ einzusetzen. Wir erhalten also:

$$\left.\begin{aligned} N_w &= \begin{matrix} 0{\cdot}5 \\ 1{\cdot}0 \end{matrix}\Bigg\} \; \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{0{\cdot}5\,\xi\,C\cos\varphi}{(f+h)\sigma p \mathcal{E} E}}\;^{1)} \\ l_{1w} &= \begin{matrix} 1{\cdot}4 \\ 1{\cdot}0 \end{matrix}\Bigg\} \sqrt[4]{\frac{(f+h)p\mathcal{E}E}{0{\cdot}5\,\xi\,C\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad \text{(XXXV)}$$

für Freileitungen mit Transformatoren, und

$$\left.\begin{aligned} N_w &= \begin{matrix} 0{\cdot}5 \\ 1{\cdot}0 \end{matrix}\Bigg\} \; \frac{\mathfrak{E}}{\zeta} \sqrt{\frac{0{\cdot}5\,\xi\,b\varrho\cos\varphi}{(f+h)\sigma p \mathcal{E} E}}\;^{1)} \\ l_{1w} &= \begin{matrix} 1{\cdot}4 \\ 1{\cdot}0 \end{matrix}\Bigg\} \sqrt[4]{\frac{(f+h)p\mathcal{E}E}{0{\cdot}5\,\xi\,b\varrho\sigma\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \quad \text{(XXXVI)}$$

für unterirdisch verlegte Kabel mit Transformatoren.

Die Formeln (XXXIII) bis (XXXVI) beziehen sich sämtlich auf einen Leiter und gelten, wie bereits hervorgehoben, sowohl für Wechsel- als Drehstrom (bezw. Gleichstrom), für Zwei- und Mehrleiteranlagen. Bei Gleichstrom ist

$$\cos\varphi = 1, \quad \xi = 2, \quad \zeta = 1, \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2} E;$$

bei Wechselstrom

$$\xi = 2, \quad \zeta = \cos\varphi, \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2} E$$

und bei Drehstrom

$$\xi = 3, \quad \zeta = \sqrt{3}\cos\varphi \quad \text{und} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{\sqrt{3}} E$$

zu setzen. Bei Mehrleitersystemen ist unter E die Spannung zwischen den Aussenleitern zu verstehen.

Werden die Speiseleitungen von einem Sammel-Speisekasten abgezweigt, der seinerseits durch eine einzige Sammelleitung mit der Centrale verbunden ist, so ist für l_s, wie leicht einzusehen, die Entfernung der Speisepunkte von dem gemeinsamen Verzweigungspunkt einzusetzen.

Soll die Leitung nicht für einen gegebenen Spannungsabfall

$$\frac{\varepsilon}{\cos\varphi} = \frac{p\mathcal{E}}{\cos\varphi},$$

sondern für einen gegebenen Energieverlust $p'\mathfrak{E}$ berechnet werden, so dass in der gesamten Leitung ($2l$ bezw. $3l$) diese Energie verloren geht, so wird bei Wechselstrom (bei Gleichstrom ist stets $p' = p$):

1) Diese Formeln geben für N bezw. l_1 bei Wechselstromdreileiter- und bei Drehstromanlagen andere Werte als die von SENGEL entwickelten, und zwar ist im ersten Falle die Zahl N der Speisepunkte im Verhältnis von $\sqrt{\frac{5}{4} \cdot \frac{1}{\cos\varphi}}$ kleiner, weil wir $\frac{\varepsilon}{\cos\varphi}$ als Spannungsabfall eingeführt haben und zufolge der entwickelten Begründung den Mittelleiter nicht in Rechnung setzen; im zweiten Falle ist N im Verhältnis von $\sqrt{\frac{\sqrt{3}}{\cos\varphi}}$ kleiner.

$$p' \mathfrak{E} = p' i E \cos \varphi = 2 p' i \mathcal{E} \cos \varphi = \frac{2 p' i \mathcal{E} \cos^2 \varphi}{\cos \varphi},$$

und bei Drehstrom:

$$p' \mathfrak{E} = p' \sqrt{3}\, i E \cos \varphi = 3 p' i \mathcal{E} \cos \varphi = \frac{3 p' i \mathcal{E} \cos^2 \varphi}{\cos \varphi}.$$

Bei gegebenem $\frac{\varepsilon}{\cos \varphi}$ ist dagegen der Energieverlust wegen der Phasengleichheit von Strom und Spannungsabfall:

$$\frac{2 i \varepsilon}{\cos \varphi} = \frac{2 p i \mathcal{E}}{\cos \varphi} \quad \text{bezw.} \quad \frac{3 i \varepsilon}{\cos \varphi} = \frac{3 p i \mathcal{E}}{\cos \varphi}.$$

Es tritt also bei Berechnung auf gegebenen prozentualen Energieverlust $p' \mathfrak{E}$ an die Stelle von p in den Formeln (XXXIII) bis (XXXVI) die Grösse $p' \cos^2 \varphi$. Und andererseits ist bei gegebenem prozentualen Spannungsverlust $p = \frac{\varepsilon}{\mathcal{E}}$ der prozentuale Energieverlust gleich $\frac{p}{\cos^2 \varphi}$.

Die Formeln (XXXIII) bis (XXXVI) können natürlich nicht zum Vergleich der Kosten von Netzen verschiedener Stromarten (Gleich-, Wechsel-, Drehstrom) oder verschiedener Anordnung (Zwei- oder Mehrleiter) dienen, da sie nur behufs Ermittelung der günstigsten Speisepunktzahl für eine bestimmte Stromart entwickelt sind. Der Vergleich der Kosten von Netzen verschiedener Anordnung und Stromart ist einem späteren Abschnitt [**144 ff.**] vorbehalten.

121. Fortsetzung. Bemerkungen zur Anwendung der Formeln.

Die Anwendung der Formeln (XXXIII) bis (XXXVI) wird sich für beliebige Netzformen am zweckmässigsten so gestalten, dass die günstigste Anzahl der Speisepunkte berechnet wird, da es leichter ist, eine gegebene Zahl von Speisepunkten im Netz zu verteilen. Eine Nachprüfung der nach Gutdünken verteilten Bezirke [**113**] ermöglicht, die günstigste Lage der Speisepunkte zu bestimmen. In der Regel werden die Netze zwischen den Speisepunkten Maschen bilden, so dass gewöhnlich mit dem Zahlenkoeffizient 1·0 gerechnet werden kann.

Da l_s und σ im allgemeinen sich von Punkt zu Punkt ändern, so wird man bei grosser Ausdehnung das gesamte Netz in mehrere Bezirke teilen, in denen diese beiden Grössen möglichst konstant sind. Bei Bestimmung des Wertes von σ ist zu beachten, dass die (im allgemeinen im Interesse des Ausgleichs zu vermeidenden) unmittelbaren Belastungen von Speisepunkten zur Netzbelastung nichts beitragen, also für σ nicht in Frage kommen. Die Summe aller für die einzelnen Bezirke erhaltenen, im allgemeinen gebrochenen Zahlenwerte ergiebt die günstigste Zahl der Speisepunkte, die auf die nächstliegende ganze Zahl abzurunden ist.

Beispiel.

Wir wollen nun die Anwendung der Formeln in einem grösseren Netz verfolgen, das in Fig. 135 im Massstab von 1:16667 dargestellt ist. Die den Verteilungsleitungen beigefügten Zahlen bedeuten den gleichzeitigen Verbrauch in KW, der auf die Strecken gleichmässig verteilt sein soll. Die umkreisten Zahlen bedeuten den Verbrauch grösserer Einzelabnehmer. Die Centrale ist vom Punkt f nach links etwa 200 m entfernt.

Die Berechnung werde zunächst für eine Gleichstrom-Dreileiteranlage von 2×110 Volt Nutzspannung durchgeführt; die Kabelanlage ist in der Erde verlegt. Der Spannungsverlust soll 1·5 % betragen, also wird

$$p = 0{\cdot}015, \quad \cos \varphi = 1, \quad \zeta = 1, \quad \xi = 2 \quad \text{und} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2} E.$$

Für eisenbandarmierte Einfach-Gleichstromkabel ergiebt die Tabelle II, S. 20, bei einem Kupferpreis von 75 £

$$a = 0{\cdot}80, \quad b = 0{\cdot}028.$$

Die Montagekosten für den laufenden Meter Kabel betragen

$$m = 0{\cdot}40 \text{ Mark},$$

ohne Kabelgraben u. s. w., die Kosten für den Anschluss einer Speiseleitung im Netz und in der Centrale mögen sich auf

$$s = 200 \text{ Mark}$$

belaufen. Der spezifische Widerstand des Kupfers sei

$$\varrho = 0{\cdot}018.$$

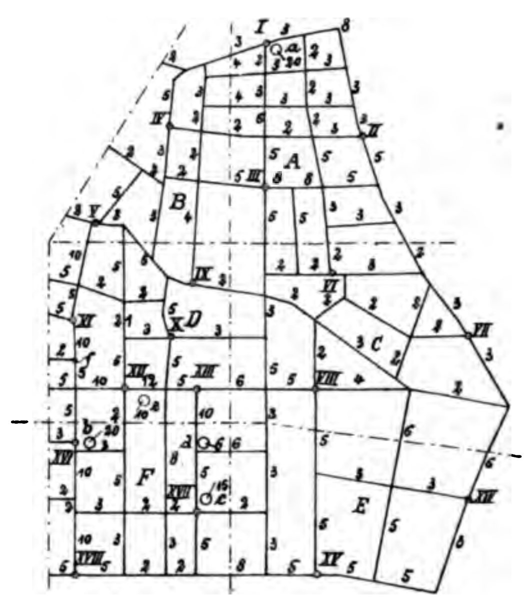


Fig. 135.

Zur Berechnung von l_s und σ werde das Netz in sechs Bezirke A bis F eingeteilt, die zu folgenden Zahlen führen:

Bezirk	A	B	C	D	E	F
Verbrauch $\mathfrak{E}$ in Watt	113000	52000	70000	131000	61000	103000
Oberfläche O in m².	150000	120000	240000	165000	180000	145000
$\sigma = \frac{\mathfrak{E}}{O}$	0·75	0·43	0·29	0·80	0·34	0·71
Länge der Speiseleitung in m	1150	750	1050	400	1300	750.

Die Gleichungen (XXXIV) ergeben daher folgende Werte:

Bezirk	A	B	C	D	E	F
N_w	2·83	2·09	2·94	5·07	2·14	3·22
l_{1w}	230	240	290	180	290	210.

Die Summe der Speisepunkte ergiebt die Gesamtzahl 18·29, also 18. Die Verteilung derselben geht aus der Fig. 135 hervor.

Bei der Grösse und der geschlossenen Form des Netzes ist auf Ausgleich keine besondere Rücksicht zu nehmen. Es wurde daher die Belastung der grösseren Verbrauchsstellen a, b und c nicht in die entsprechenden Zahlen für $\mathfrak{E}$ einbezogen, weil sich im Interesse möglichst geringer Kosten des Verteilungsnetzes die Anlage von Speisepunkten an diesen Stellen starken Verbrauchs empfiehlt. Die Verteilung der Speisepunkte liess sich auch zwanglos unter Benutzung der Punkte a, b und c vollziehen.

Eine zweite Berechnung des Netzes soll unter Voraussetzung von hochgespanntem einphasigen Wechselstrom erfolgen. Die Spannung des Primärnetzes sei zu 2000 Volt, die des Sekundärnetzes wieder zu 2×110 Volt angenommen, das letztere soll also wieder als Dreileiteranlage ausgeführt werden. Der maximale Spannungsverlust betrage ebenfalls $100\,p\,^0/_0$, so dass der Spannungsabfall in den Verteilungsleitern $\frac{p}{\cos\varphi}\,\mathcal{E}$ Volt ist. Der mittlere Leistungsfaktor sei zu $\cos\varphi = 0{\cdot}9$ angenommen. Für dreifach konzentrische Verteilungskabel (Querschnitt des Mittelleiters gleich der Hälfte desjenigen der Aussenleiter) erhalten wir die Faktoren a und b bezogen auf einen Aussenleiter zu $a = 0{\cdot}85$, $b = 0{\cdot}027$ (Tabelle II). Die Kosten eines einphasigen Wechselstrom-Transformators können im Mittel zu $300 + 45\,\mathfrak{A}$ angesetzt werden (für Drehstrom-Transformatoren entsprechend $400 + 55\,\mathfrak{A}$). Die Herstellung einer Transformatorenstation, einschliesslich der Schaltanlage, verursache eine Ausgabe von 1100 Mark, für den Anschluss einer Transformatorenstation an das primäre Netz mögen im Mittel 400 Mark in Ansatz gebracht werden, so dass $f + h = 1800$ Mark wird. Die Einteilung des Netzes in sechs Bezirke behalten wir bei und vernachlässigen wieder den Verbrauch der Belastungsstellen a, b und c bei der Ermittelung von $\mathfrak{E}$, da deren Grösse die Aufstellung besonderer Transformatoren rechtfertigt und empfiehlt.

Hier ist also

$$p = 0{\cdot}015, \quad \zeta = \cos\varphi = 0{\cdot}90, \quad \xi = 2 \quad \text{und} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2}\,E;$$

daher wird nach Gleichung (XXXVI):

für den Bezirk .	A	B	C	D	E	F
N_w	3·75	2·28	3·74	4·21	3·01	3·51
l_{1w}	210	240	270	210	260	210.

Die Gesamtzahl der Transformatoren ist $20{\cdot}5 \doteq 21$, ihre Verteilung ist in Fig. 136 dargestellt.

Für das Hochspannungsnetz haben wir $E = 2000$ Volt angenommen. Da wir mit einer Ringleitung auskommen, so haben wir das ganze Speisegebiet als einen Netzbezirk zu behandeln, dessen Schwerpunkt von der Centrale $l_s = 650$ m entfernt ist. Stromverzweigungen sind jetzt nicht vorhanden, also gelten die oberen Zahlenfaktoren der Formeln. Als Spannungsverlust setzen wir $\varepsilon = 0{\cdot}01\,\mathcal{E}$ fest, der primäre Leistungsfaktor sei

$$\cos\varphi = 0{\cdot}85.$$

Die primäre Leistung erhalten wir aus der bisher in der Rechnung berücksichtigten Belastung von 530000 Watt vermehrt um die Belastungen a, b und c unter Zugrundelegung eines Verlustes von

$$\frac{p}{\cos^2\varphi} = \frac{0{\cdot}015}{0{\cdot}9^2} \doteq 0{\cdot}02$$

im Sekundärnetz, 0·05 in den Transformatoren und

$$\frac{0{\cdot}01}{0{\cdot}85^2} = 0{\cdot}014$$

im Primärnetz zu $\mathfrak{E} = 630000$ Watt; die ganze Oberfläche des Netzes beträgt $O = 1000000$ Quadratmeter, also ist $\sigma = 0{\cdot}63$. Für verseilte Zweileiter-Hochspannungskabel (bis 3000 Volt) ergiebt die Tabelle II die Zahlen $a = 1{\cdot}30$, $b = 0{\cdot}041$; ferner koste die Verlegung eines Meters des Doppelkabels 0·60 Mark, so wird, bezogen auf einen Leiter, $m = 0{\cdot}30$. Die Kosten des Anschlusses einer Hochspannungs-Speiseleitung in der Centrale und in

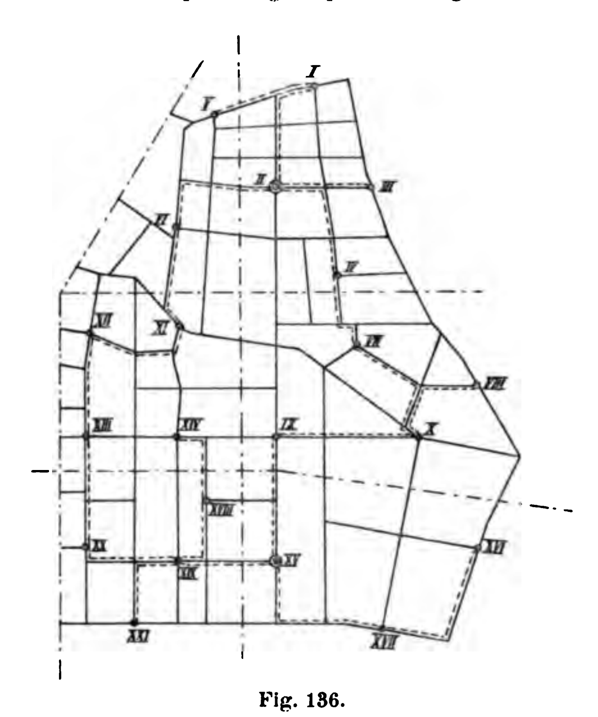


Fig. 136.

der Transformatorenstation des Netzes seien mit $s = 500$ Mark in Rechnung gebracht. Da hier schliesslich wieder

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} E \quad \text{und} \quad \xi = 2,$$

ferner

$$\zeta = \cos\varphi = 0{\cdot}85 \quad \text{und} \quad p = 0{\cdot}01$$

zu setzen ist, so ergiebt die Formel (XXXIV) mit den Faktoren für unverzweigte Netze die Zahlen

$$N_w = 1{\cdot}65 \cdot 2 \quad \text{und} \quad l_{1w} = 840.$$

Am geeignetsten für die Unterbringung der Hochspannungs-Verteilungsschalttafeln erscheinen die Transformatorenstationen II und XV (in der Fig. 136 durch Doppelkreise hervorgehoben), so dass das Primärnetz die durch gestrichelte Linien angedeutete Form erhält. Zur Vermeidung von

Verzweigungen in der Hochspannungsleitung, die schwache Stellen des Kabelnetzes bilden würden, sind die Verbindungen abzweigender Transformatoren stets bis zur nächsten Transformatorenstation geführt worden.

122. Die Speiseleitungen.

Ist nun bei gegebener Lage der Centrale auf Grund der Ableitungen der letzten Abschnitte die Berechnung der günstigsten Zahl und Lage der Speisepunkte und die Bemessung der Querschnitte des Verteilungsnetzes erfolgt, ist ferner die endgültige Strom- und Spannungsverteilung berechnet, die Kontrolle auf maximalen Spannungsverlust und auf Feuersicherheit der Querschnitte erledigt, so sind schliesslich die Querschnitte der Speiseleiter zu bestimmen. Da diese offene Leitungen darstellen, so folgt ihr Querschnitt sofort aus Gleichung (I) [**3**] zu

$$q_s = \frac{J_s\, l_s\, \varrho}{\varepsilon_s} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(XXXVII)}$$

falls J_s der Belastungsstrom des Speisepunktes s, l_s seine Entfernung von der Centrale und ε_s der zulässige Spannungsverlust ist. Es sind also allein noch Bestimmungen über die Grösse von ε_s zu treffen.

Wie wir bereits gesehen haben [**95**], ist man gezwungen, in den Speiseleitern einen grösseren Verlust zuzulassen, als der Elastizität entsprechen würde, da andernfalls die Kosten des Netzes zu hoch werden würden. Die Speiseleitungen stellen sich also als unelastische Netzteile dar, d. h. als nicht selbstregulierende Netzteile, deren Spannungsänderungen jedoch so langsam erfolgen, dass eine Regelung der Speisepunktsspannung auf konstante Höhe leicht am Schaltbrett der Centrale erfolgen kann. Sind daher Rücksichten auf Elastizität nicht zu nehmen, so wird man den Spannungsverlust so hoch wählen, dass den Bedingungen der Wirtschaftlichkeit Genüge geleistet wird. Die hierbei zu berücksichtigenden Verhältnisse sind ausführlich in den Abschnitten [**13**] ff. dargelegt worden, so dass hier nichts hinzuzufügen ist.

Ergiebt nun die Rechnung einen wirtschaftlichen Energieverlust $\mathfrak{e}_w$ bezw. Spannungsverlust ε_{sw} in den Speiseleitungen, so ist der Wert der Ermittelung der Querschnitte aller Speiseleitungen zu Grunde zu legen, da ja bei Vollbelastung die Spannungen an sämtlichen Speisepunkten gleich sein sollen. Daraus folgt auch, dass die berechneten Querschnitte mit möglichster Genauigkeit einzuhalten sind. Ist dies nicht angängig, etwa weil sich Grössen ergeben hatten, die fabrikationsmässig nicht hergestellt werden, so wird man sich dadurch helfen, dass man den nächstgrösseren Querschnitt wählt und den Widerstand des Speiseleiters durch einen (in der Centrale) vorgeschalteten festen Widerstand auf den berechneten Betrag bringt. Ebenso ist man genötigt, von dem wirtschaftlichen Querschnitt eines Speiseleiters abzugehen, wenn er der Feuersicherheit nicht Genüge leistet; auch dann muss man einen entsprechend grösseren Querschnitt wählen und durch einen festen Vorschaltwiderstand den berechneten Widerstand erreichen. Tritt dieser Fall bei allen oder doch bei der Mehrzahl der Leiter auf, so wird man natürlich auf den wirtschaftlichen Spannungsverlust verzichten und einen entsprechend kleineren Wert der Rechnung zu Grunde legen.

Nunmehr kann schliesslich die Nachrechnung des Netzes auf Ausgleich erfolgen [**95** ff.]. Auch diese Rechnung kann, wie wir gesehen haben, zu einer Verminderung des wirtschaftlichen Spannungsverlustes Veranlassung geben, wenn auch dieser Fall nur äusserst selten eintreten dürfte.

123. Sammelleitungen.

Laufen zwei oder mehr Speiseleiter auf grössere Strecken einander parallel, so fasst man sie gern zu einer sogenannten Sammelleitung zusammen (vgl. Fig. 119, S. 174), da, wie bereits erwähnt [**100**], eine dickere Leitung in den Anschaffungs- und Verlegungskosten, sowie besonders auch für den Ausgleich günstiger ist, als mehrere dünne Leiter. Dagegen hat man allerdings den Nachteil eines grösseren Störungsgebietes für den Fall eines Fehlers in der Sammelleitung in den Kauf zu nehmen. Besonders bei Hochspannungsnetzen, deren Energiequelle weit vom Gebrauchsort entfernt ist, wird man gern die sämtlichen Speiseleitungen zu einer oder, wenn deren Querschnitt zu gross werden sollte, bezw. wenn man für den Fall einer Störung eine Reserve vorsehen will, zu zwei Sammelleitungen zusammenfassen.

Die Frage, wie der gesamte Spannungsverlust ε_s auf den verzweigten und unverzweigten Teil der Leitung zu verteilen sei, haben wir bereits gelegentlich der Berechnung verzweigter offener Leiter erledigt [**42 ff.**]. Von den dort gegebenen drei Lösungen werden wir hier natürlich diejenige auf günstigstes Kupfervolumen wählen, wir haben also die Gleichung (45) [**43**] anzuwenden.

124. Teilung der Speiseleiter.

Den Gegensatz zur Zusammenfassung mehrerer Speiseleiter zu einem bildet die Teilung eines dicken Speiseleiters in zwei oder mehrere parallel geschaltete dünnere Stränge. Bringt das erste Verfahren bei langen Leitungen Vorteil, deren Belastung infolge des beschränkten Spannungsverlustes auch bei grösseren Querschnitten nicht leicht über die feuersichere Stromdichte steigt, so ist die Teilung der Leiter bei kurzen Speiseleitungen am Platz. Hier kann es nämlich leicht vorkommen, dass der wirtschaftliche Spannungsverlust nicht ausgenutzt werden kann, weil die Stromdichte zu gross wird. Wie aber die Tabelle I, S. 6, zeigt, können dünne Querschnitte spezifisch stärker beansprucht werden als dicke. Wählt man also anstatt einer dicken zwei oder mehrere dünnere Leitungen, so lässt sich häufig ein Vorschaltwiderstand vermeiden.

Diese Teilung der Leitung in mehrere parallele Leiter kann man nach einem Vorschlage von MÜLLENDORFF[1]) zugleich dazu benutzen, um den Ausgleich eines Netzes zu verbessern, bezw. um die Kosten der Ausgleichsleiter eines Netzes zu verringern. Wie wir [**96**] gesehen haben, entsteht bei veränderlicher Netzbelastung der Spannungsunterschied ε_{MN} an zwei Speisepunkten dadurch, dass die eine Speiseleitung einen verhältnismässig grösseren Strom führt, als die andere, so dass der Spannungsverlust

$$\eta_M \varepsilon_s \gtrless \eta_N \varepsilon_s$$

wird. Erhöht man nun den Widerstand der den geringeren Strom führenden Leitung durch Abschalten eines oder mehrerer Teilleiter, so gleicht sich der Spannungsverlust in den beiden Speiseleitungen mehr oder weniger aus und die den Querschnitt der Ausgleichsleitung beeinflussende Grösse $\overline{\varepsilon}_{MN}$ wird kleiner. Natürlich müssen stets der positive und der negative Teilleiter gleichzeitig abgeschaltet werden. Für kleine Centralen, bei denen naturgemäss die Belastungsverschiedenheiten grösser werden und oft stark ins Gewicht fallen, sind mit diesem Regelungsverfahren auf einfachem und billigem Wege gute Erfolge zu erzielen.

1) E. MÜLLENDORFF: Ein neues Verfahren zur Spannungsregelung in Verteilungsnetzen. ETZ 1904, S. 871.

125. Die günstigste Lage der Centrale.

Die günstigste Lage der Centrale, d. h. diejenige Lage, für welche die Kosten für die Anlage und den Betrieb des ganzen Werkes ein Minimum werden, hängt, soweit die Netzkosten in Betracht kommen, nur von der Länge der Speiseleitungen ab, da ja die Kosten des Verteilungsnetzes bereits durch die Bedingungen der Elastizität und des Ausgleichs, die Energieverluste durch die Bedingung des wirtschaftlichen Energie- und Spannungsverlustes festgelegt sind. Hat man daher vollständig freie Wahl für die Lage der Centrale, so wird man sie demgemäss unter sonst gleichen Bedingungen möglichst in den Schwerpunkt des Verteilungsnetzes, also bei Städten im allgemeinen in das Centrum des Stadtgebietes legen müssen.

Bedenkt man aber, dass die Anlagekosten für den Bauplatz im Innern viel teurer sind, als an der Peripherie oder ausserhalb der Stadt, dass ferner die Herbeischaffung des Heizmaterials und des zur Kesselspeisung und zur Kondensation nötigen Wassers, die Abfuhr der Asche u. s. w. im Innern der Städte schwerer zu bewerkstelligen ist und gleichfalls mehr Kosten verursacht, so ist leicht einzusehen, dass bei der Wahl des Ortes für eine Centrale nicht die reinen Anlage- und Betriebskosten des Netzes allein ausschlaggebend sein können. Ferner hat man wohl auch nie unbeschränkt die Wahl der Lage frei, es kann sich gewöhnlich höchstens darum handeln, zu entscheiden, welcher von mehreren zur Anlage des Werks geeigneten Punkten der günstigere sei.

Für die Netzkosten, die wir hier allein ins Auge fassen, bleibt dagegen der Satz bestehen, dass diejenige Lage der Centrale die günstigere ist, die näher dem Verteilungsgebiet liegt. Zwar nimmt die günstigste Zahl der Speisepunkte, wie wir wissen [**119, 120**], mit zunehmender Entfernung der Centrale vom Speisegebiet ab, jedoch nur angenähert mit der Quadratwurzel, dagegen wachsen bei gegebenem Spannungsverlust ε_s die Anlagekosten der Leitung fast proportional dem Quadrat der Länge, wie aus der bereits mehrfach benutzten Gleichung für die Kosten hervorgeht. Bei gegebener Speisepunktzahl erhält sie die Form:

$$K = \Sigma\,[(a + b\,q)\,l_s + s/\xi] = \Sigma\left(a\,l_s + \frac{b\,J_s\,l_s^2}{\varepsilon_s} + \frac{s}{\xi}\right).$$

Aus ihr ist weiterhin ersichtlich, dass diejenigen Leitungen die kürzesten sein sollen, die den stärksten Strom führen, d. h. diejenige Lage der Centrale ist die günstigere, die dem am stärksten belasteten Teil des Speisegebiets am nächsten ist.

Bei diesen vergleichenden Rechnungen braucht der genaue Spannungsverlust ε_s ebenso wenig wie die genauen Längen l_s bekannt zu sein, da es sich hierbei um die Ermittelung relativer Werte handelt, also die Benutzung angenäherter Zahlen die Ergebnisse nicht beeinträchtigt.

126. Einige Erfahrungszahlen aus der Statistik bestehender Werke.

Wir haben in den letzten Abschnitten verfolgt, wie bei gegebenen Verbrauchsgrundlagen die Netze aufzubauen sind, wie wir uns über die günstigste Lage der Centrale ein Urteil bilden, die günstigste Zahl und Lage der Speisepunkte berechnen können. Wie die Entfernung der Speisepunkte von den verschiedenen Netzfaktoren abhängt, ist ausführlich im Abschnitt [**117**], S. 209 diskutiert worden. Ausgeführte Niederspannungsnetze zeigen Abstände von Speisepunkten, die je nach der Betriebsspannung etwa in den Grenzen 150 bis 300 m liegen, während bei Hochspannungsnetzen diese Entfernungen auf

1000 m und darüber steigen. Diesen Zahlen ordnen sich die in dem berechneten Beispiele (S. 213 ff.) gefundenen gut ein.

Das eigentliche Netz war von den beiden eben erwähnten Bestandteilen der Anlage insofern ganz unabhängig, als seine örtliche Ausdehnung und Form von vornherein durch die Lage der Abnehmer gegeben ist. Die an den Strassenecken sich kreuzenden Kabel werden in Verteilungs-, bezw. wenn an die betreffende Ecke ein Speisepunkt fällt, in Speisekästen vereinigt, in denen sie durch Sicherungen gegen zu grosse Erwärmung geschützt werden. Diese dienen zugleich zum Abschalten von Kabelstrecken, etwa wenn Messungen oder Reparaturen an ihnen vorgenommen werden sollen. In geschäftsreichen Strassen, die starke Belastungen ergeben, werden beide Seiten mit Kabelzügen belegt, wie man überhaupt von dieser Massnahme Gebrauch machen wird, sobald überschlägliche Rechnungen zeigen, dass die Verlegung zweier Kabel vom halben Querschnitt billiger ist, als die zum Anschluss der auf der anderen Strassenseite zu erwartenden Abnehmer nötigen Hausanschlussleitungen. Querschnitte von über 500 mm² in unterirdischen Kabelanlagen und über 50 mm² in Luftleitungsnetzen sind möglichst zu vermeiden, solche von über 1000 bezw. 100 mm² sind unter allen Umständen praktisch unbrauchbar, da sie so steif bezw. (die blanken Kabel) so schwer werden, dass sie nicht mehr verlegt werden können. Nach unten hin bilden die äussersten Grenzen 25 mm² für Kabelnetze, 10 mm² für Luftleitungsnetze, doch geht man in Kabelnetzen nicht gern unter 35 mm².

Im allgemeinen wird man es vermeiden, bei der Belastung der Kabel bis an die Grenze der Feuersicherheit zu gehen, da die Leiter auch dann sich nicht erwärmen, bezw. ihre Sicherungen auch dann nicht abschmelzen sollen, wenn sie infolge einer Betriebsstörung die Belastung einer Nachbarleitung mit übernehmen müssen, oder in Verteilungsnetzen die Stromzuführung anstatt von beiden nur von einer Seite her erfolgen kann.

Für den maximalen Spannungsverlust im Verteilungsnetz hatten wir [5] die Grösse 0·03 $\mathcal{E}$ gefunden, die auf das eigentliche Verteilungsnetz und auf die Anschlüsse zu verteilen ist. Gewöhnlich bemisst man den Verlust im Netz auf 2 % und rechnet ebenso viel auf die Anschlüsse und Hausinstallationen. Die Praxis hat gezeigt, dass ein Verlust von insgesamt 4 % durchaus zulässig ist, dass also die Glühlampen dabei einwandsfrei brennen. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, dass die Spannungsschwankungen eines Netzes zeitlich sehr langsam verlaufen, da die Schalteinheiten im Vergleich zur Belastung der die Verluste verursachenden Kabel fast ausnahmslos gering sind, bezw. durch entsprechende Vorschriften der Centralen gering gehalten werden.

Der Spannungsverlust in den Speisekabeln wird so hoch genommen, als es die Rücksichten auf Wirtschaftlichkeit und Ausgleich zulassen. Ausgeführte Netze zeigen im Mittel einen Verlust von 10 %; die Grenzen sind etwa 6 und 15 %, doch finden sich in Ausnahmefällen Verluste bis zu 20 %.

In Centralen-Netzen kommt es wohl nie vor, dass alle Energieverbraucher, also Lampen und Motoren, zugleich im Betrieb sind. Das Verhältnis der im Augenblick des grössten Verbrauches zugleich im Betrieb befindlichen Belastung zum gesamten Anschlussäquivalent heisst der „**Belastungsfaktor**". Er liegt je nach der Grösse und Belastungsart der Netze zwischen 0·4 und 0·7 und ist bei reinen Beleuchtungsanlagen und kleinen Netzen grösser als bei gemischten Betrieben und grossen Netzen. Für verschiedene Netzteile muss

er ebenfalls verschieden gross angenommen werden; er wird um so grösser ausfallen, je mehr die angeschlossenen Verbraucher der gleichen Verbrauchskategorie angehören. Ist also das Netz für eine gegebene Anzahl anzuschliessender Energieverbraucher zu berechnen, so wird man diesem Umstande entweder dadurch Rechnung tragen, dass man sie in entsprechendem Verhältnis vermindert oder — bequemer — den maximalen Spannungsverlust erhöht.[1])

Nicht selten tritt der Fall ein, dass man behufs Feststellung der ungefähren Kosten genötigt ist, eine Überschlagsberechnung anzustellen, ohne Angaben für die Belastung zu besitzen. Man ist dann gezwungen, sich der Erfahrungszahlen zu bedienen, die die Statistik für ähnliche bestehende Werke giebt. Wiewohl solche Zahlen stets mit äusserster Vorsicht zu gebrauchen sind, seien einige Tabellen, die von Nutzen sein können, im folgenden nach den Zusammenstellungen von HOPPE,[2]) sowie von E. v. MILLER[3]) über Anschlusszahlen und Anlagekosten neuerer Centralen wiedergegeben.

Tabelle X.

Anschlusszahlen neuerer Centralen bezogen auf 1000 Einwohner (HOPPE).

Einwohner-Zahlen	Anschlusszahlen in KW		
	Beleuchtung	Mech. Energie	Gesamt
unter 10 000	27	14·6	41·6
10 000 bis 50 000	13·9	9·1	23·0
50 000 bis 150 000	11·9	6·3	18·2

Tabelle XI.

Anlagekapital von Centralen (in Mark; HOPPE).

Einwohner-Zahlen	Gesamt-Anlagekapital		Grundstück u. Bauten		Maschinen und Kessel mit Zubehör für 1 PS	Akkumulatoren für 1 KW	Netz für	
	für 1 KW	für 1000 Einw.	für 1 m² Heizfläche	für 1 PS Leistung			1 KW	1000 Einw.
unter 10000	1860	45000	560	410	710	425	300	12800
10000 bis 50000	1339	23000	284	187	400	372	320	6900
50000 bis 150000	1492	—	—	—	—	—	—	-

Verhältnis der Anlagekosten des Leitungsnetzes zu den Gesamtanlagekosten

1 : 3 bezw. 1 : 3·6.

1) Über die Berücksichtigung des Belastungsfaktors bei der Wahl der Maschineneinheiten siehe NORBERG-SCHULZ: Der Belastungsfaktor elektrischer Beleuchtungscentralen. ETZ 1905, S. 919.

2) FRITZ HOPPE, Was lehren die Statistiken . . . Darmstadt.

3) E. v. MILLER, Die Versorgung der Städte mit Elektrizität . . . Darmstadt 1896. Hier finden sich auch Winke für die Erhebung der Anschlusszahlen für neu zu errichtende Centralen.

Tabelle XII.

Anschlusszahlen für Strassen- und Privatbeleuchtung (v. MILLER).

	Für 100 m Strassenlänge	Für 1000 Einwohner
Elektrische Strassenbeleuchtung		
Glühlampen	2·5 bis 4	—
Bogenlampen	1 bis 2	—
Privatbeleuchtung		
Glühlampen zu 16 HK . .	30 bis 90	100 bis 400
Mechanische Energie		
PS zu 900 Watt	—	2 bis 10

127. Erweiterung der Netze.

Wie die Erfahrung lehrt, nimmt das Bedürfnis für Licht und Energie in den elektrischen Centralen von Jahr zu Jahr zu. Man trägt dieser Thatsache vielfach schon bei der Ausarbeitung der Kostenanschläge Rechnung, indem man von vornherein sowohl die Centrale als das Netz für eine entsprechend grössere Leistung entwirft. Von diesem Entwurf wird dann im „ersten Ausbau“ zunächst nur ein Teil ausgeführt, der die Bedürfnisse der ersten Jahre deckt, während die übrigen Teile, vielleicht auf Grund der im Betrieb gesammelten Erfahrungen oder technischer Fortschritte modifiziert, einem „zweiten Ausbau“ vorbehalten bleiben. In einem solchen Falle wird das Netz für die grösste in Aussicht genommene Belastung berechnet. Dem zunächst zu verlegenden Teil des Netzes werden diejenigen Querschnitte gegeben, die dieser Berechnung entsprechen, auch wenn im Anfang die Belastung eine geringere sein sollte und mit dünneren Leitungen befriedigt werden könnte. Man erreicht dadurch, dass man bei steigender Belastung und Ausdehnung des Netzes die einmal verlegten Leitungen nicht zu verstärken oder auszuwechseln braucht (wodurch sie stets entwertet werden), dass man also einerseits Verluste für die Zukunft vermeidet, andererseits ohne den organischen Zusammenhang des Netzes zu stören, neu eintretenden Bedarf sofort befriedigen kann.

Um Anhaltspunkte für die Zunahme der Anschlusswerte grosser und kleiner Centralen zu geben, seien einige der Statistik entnommene Zahlen angeführt.

Tabelle XIII.

Zunahme des Anschlusswertes der Berliner Centralen (KW).

Jahr	1886	1891	1896	1900	1904
Licht	645	5 333	12 975	21 122	36 195
Energie (ohne Bahnbetrieb)	—	288	4 633	22 037	44 448

Tabelle XIV.

Zunahme der Anschlusswerte in grossen Städten (KW).

Jahr . . .	1888	1890	1894	1904
Barmen . .	86	270	470	2290
Düsseldorf .	(1891)	580	960	5730
Elberfeld .	„	490	600	4610
Hannover .	„	580	920	5610
Mühlhausen	„	450	670	2690
Stettin . .	„	310	720	4550
Kassel . .	(1892)	210	320	1560
Köln . . .	„	540	1150	6830

Tabelle XV.

Zunahme des Anschlusses in kleinen Städten (KW).
Mittel aus vier Betrieben (Hoppe).

Betriebsjahr	1	2	3	4
Anschlusswert bezogen auf 1000 Einwohner	2·8	5·6	6·9	8·0

Die Mehrleitersysteme.

128. Anwendungsgebiet des Mehrleitersystems.

Alle unsere bisherigen Betrachtungen über die Bestimmung der Strom- und Spannungsverteilung und die Bemessung der Querschnitte bezogen sich ausschliesslich auf Zweileiternetze, wenn auch hin und wieder im Text auf Mehrleiteranlagen Bezug genommen worden ist. Im Laufe der Untersuchung war bereits mehrfach der Einfluss der Spannung auf die Kosten des Netzes hervorgetreten; wir haben gefunden, dass, besonders bei räumlich stark ausgedehnten Speisegebieten, die Spannung möglichst hoch genommen werden musste, sollten die Herstellungskosten des Netzes nicht einen Betrag erreichen, dass die Anlage Gefahr lief, unrentabel zu werden. Ebenso aber haben wir gefunden, dass die Höhe der Netzspannung durch die Spannung der Energieverbraucher begrenzt ist, und zwar lag diese Grenze bei Bogenlampen in der Gegend von etwa 50, für Glühlampen zunächst bei etwa 110, später bei 220 Volt[1]) [34]. Da jedoch dieser Spannungsbereich bei ausgedehnten Verteilungsgebieten nicht mehr genügte, so musste man auf Mittel bedacht sein, ihn noch mehr zu erweitern.

Hier bot nun die Reihenschaltung der Verbraucher einen Ausweg, der aber nicht ohne weiteres gangbar war, falls eine vollständige Unabhängigkeit der Verbrauchsapparate voneinander zur Bedingung gemacht wurde. Erst die Mehrleitersysteme, von denen das Drei- und das Fünfleitersystem praktische Bedeutung erlangt haben, lösten das gestellte Problem zur Zufriedenheit.

Es ist nunmehr unsere Aufgabe zu zeigen, worin sich die Berechnung der Mehrleitersysteme von derjenigen des Zweileitersystems unterscheidet, bezw. wie die Berechnung der ersteren auf die des letzteren zurückgeführt wird.

Das Dreileitersystem.

129. Entstehung des Dreileitersystems und Bezeichnungen.

Schalten wir zwei vollständige elastische Zweileiter-Parallelschaltungsanlagen, deren Spannung E_2 ist, in Reihe, so dass also der negative Pol der einen Maschine mit dem positiven der anderen, die (negative) Rückleitung

1) Über die Vor- und Nachteile der 110 und 220 Voltspannung in Centralen vgl. E. WIKANDER: Die Wahl der Verbrauchsspannung für neu anzulegende Elektrizitätswerke. ETZ 1905, S. 947.

der ersten Anlage mit der (positiven) Hinleitung der zweiten vereinigt werden (Fig. 137), so entsteht das Dreileitersystem.[1]) Die beiden äusseren Leiter heissen die Aussenleiter, und zwar der positive und negative Aussenleiter, der mittlere Leiter wird der neutrale, Mittel-, Ausgleichs- oder Nullleiter des Systems genannt. Wo eine Unterscheidung nötig erscheint, bezeichnen wir

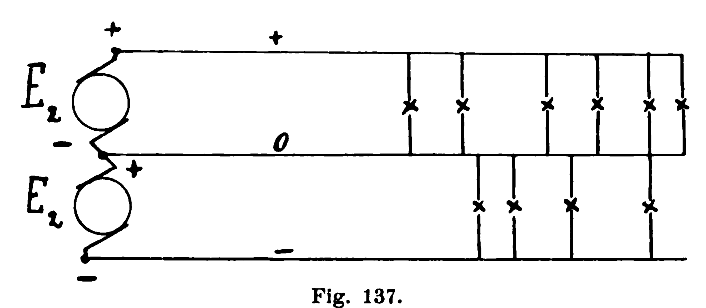


Fig. 137.

die Grössen der positiven Leitung ausser ihren Indizes mit vorgesetztem Index *p*, die der negativen mit *n* und diejenigen der Nullleitung mit 0. Die Gesamtspannung des Systems ist

$$E = 2\,E_2 = 2\,\mathcal{E},$$

die Spannung gegen Null

$$\mathcal{E} = E_2.$$

Die Betrachtung der Fig. 137 lehrt unmittelbar, dass beide Hälften des Systems voneinander unabhängig sind. Jede Lampe kann einzeln ein- oder ausgeschaltet werden, ohne eine andere in Mitleidenschaft zu ziehen, im Gegensatz zur gewöhnlichen Reihenschaltung zweier Lampenreihen (Fig. 138),

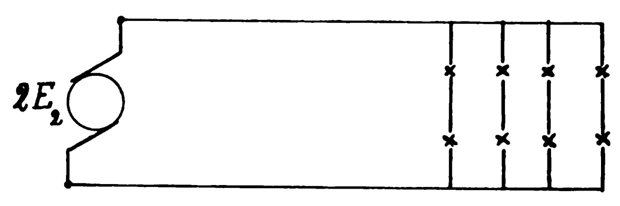


Fig. 138.

bei der durch die Ausschaltung einer Lampe zugleich die Ausserbetriebsetzung einer zweiten Lampe veranlasst wird, da ihrem Strom keine Rückleitung zur Stromquelle zur Verfügung steht.

130. Stromverteilung im Dreileitersystem. Wie aus der Entstehung des Dreileitersystems aus zwei getrennten Zweileitersystemen unmittelbar gefolgert werden kann, unterscheidet sich die Stromverteilung der beiden Aussenleiter in nichts von derjenigen des positiven bezw. negativen Leiters der entsprechenden als unabhängiger Zweileiter gedachten Systemhälfte: der Strom ist in jedem Teile des Leiters gleich der Summe der nachfolgenden Abzweigungen:

$$J_{p,\nu-1,\nu} = \sum_{\nu}^{n} i_{p\nu};\quad J_{n,\nu-1,\nu} = \sum_{\nu}^{n} i_{n\nu}$$

1) Das Dreileitersystem ist von J. HOPKINSON angegeben worden, D. R.-P. No. 25205 vom 22. Februar 1883.

(Fig. 139). Der Strom im Nullleiter dagegen entsteht durch Überlagerung der beiden Aussenleiterströme, da ja in den getrennten Zweileitersystemen der negative und positive Leiter gleiche Ströme führen. Es ist also unter Beachtung der Vorzeichen:

$$J_{001} = -J_{p01} + J_{n01} = -(J_{p01} - J_{n01})$$
$$J_{012'} = -(J_{p12} - J_{n01})$$
$$J_{01'2} = -(J_{p12} - J_{n12}) \text{ u. s. w.}$$

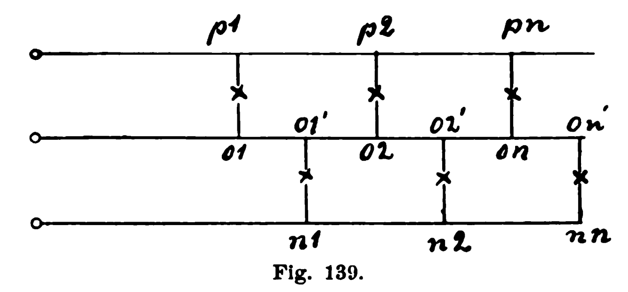


Fig. 139.

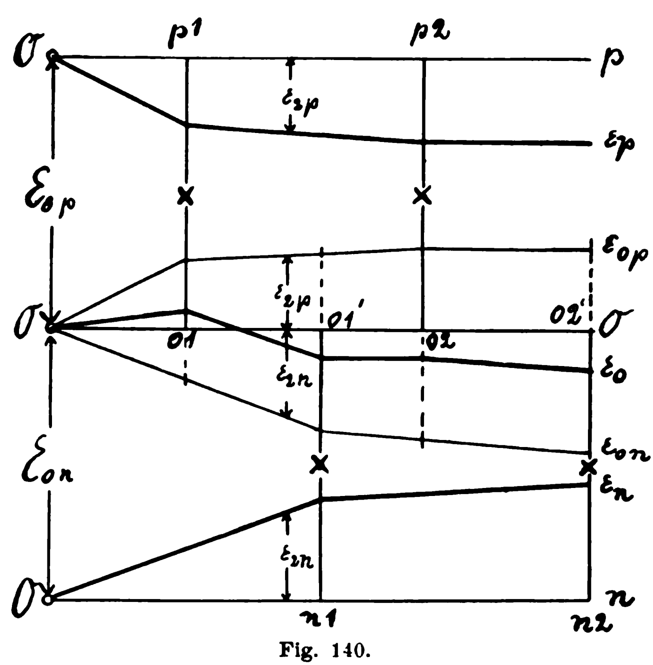


Fig. 140.

In Worten: **Der Strom im Nullleiter ist gleich der negativen Differenz der entsprechenden positiven und negativen Aussenleiterströme.** In seinen verschiedenen Teilen kann daher der Nullleiter stromlos sein oder Ströme entgegengesetzter Richtung führen, je nachdem die diesen Strecken entsprechenden Aussenleiterströme gleich sind oder der positive und negative Aussenleiterstrom überwiegt.

131. Spannungsverteilung im Dreileitersystem. Wie die Stromverteilung, so ist auch die Spannungsverteilung in den Aussenleitern dieselbe, wie in den entsprechenden Leitern der unabhängigen Zweileitersysteme, und der Spannungsverlust des Mittelleiters entsteht durch

Überlagerung der Spannungsverluste der beiden Aussenleiter, vorausgesetzt, dass alle drei Leiter gleichen Querschnitt besitzen. Unter der letzten Voraussetzung erhalten wir demnach die graphische Darstellung der Fig. 140, wenn wir, wie gewöhnlich, den Spannungsverlust als positiv in der Richtung von den Klemmen der Maschine zur Leitung festsetzen und die positiven Spannungsverluste unterhalb der Horizontalen auftragen. ε_p ist also stets eine positive, ε_n stets eine negative Grösse, während ε_0 sowohl positive als negative Werte annehmen kann. Im folgenden sollen daher unter ε_p und ε_n stets die absoluten Werte der Spannungsverluste verstanden sein, ε_0 dagegen soll mit dem Vorzeichen $+$ oder $-$ behaftet sein, je nachdem es die Richtung von ε_p oder ε_n hat. Die Spannungsverlustkurven $O\varepsilon_p$, $O\varepsilon_0$ und $O\varepsilon_n$ über Op, Oo und On geben die Spannungsverteilung in den drei Leitern; die Spannungsverlustkurve $O\varepsilon_0$ entsteht durch algebraische Addition der beiden Kurven $O\varepsilon_{0p} = - O\varepsilon_p$ und $O\varepsilon_{0n} = - O\varepsilon_n$.

Es folgt also, dass bei gleichem Querschnitt aller drei Leiter im allgemeinen der gesamte Spannungsverlust einer Netzhälfte $\varepsilon_p - \varepsilon_0$ bezw. $\varepsilon_n + \varepsilon_0$ kleiner ist als $2\varepsilon_2$, wenn unter ε_2 der im Zweileitersystem im einfachen Leiter auftretende Spannungsverlust verstanden ist. Der gesamte Spannungsverlust würde erst dann den Wert $2\varepsilon_2$ erhalten, wenn die Belastung einer Systemhälfte ganz verschwindet. Ferner ist ersichtlich, dass der Spannungsverlust ε_0, wenn er positiv ist, sich von dem Verlust im positiven Aussenleiter subtrahiert, dagegen zu demjenigen des negativen Aussenleiters addiert, und umgekehrt. Da nun die Spannung $\mathcal{E}$ am Ende der Leitung gleich derjenigen am Anfang $\mathcal{E}_0$ vermindert um den gesamten Verlust in der Hin- und Rückleitung ist, also

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_{p0} - (\varepsilon_p - \varepsilon_0) = \mathcal{E}_{p0} - \Delta\varepsilon_p; \quad \mathcal{E}_n = \mathcal{E}_{n0} - (\varepsilon_n + \varepsilon_0) = \mathcal{E}_{n0} - \Delta\varepsilon_n,$$

so folgt, dass die Spannung in der einen Systemhälfte unter Umständen am Ende der Linie grösser sein kann, als am Anfang. Ist nämlich ε_0 positiv und grösser als ε_p, so wird $\Delta\varepsilon_p$ negativ und folglich

$$\mathcal{E}_p > \mathcal{E}_{p0},$$

während zugleich

$$\mathcal{E}_n < \mathcal{E}_{n0}$$

sein muss, da $\Delta\varepsilon_n$ positiv ist. Ist andererseits ε_0 negativ und grösser als ε_n, so ist $\Delta\varepsilon_n$ negativ, also

$$\mathcal{E}_n > \mathcal{E}_{n0},$$

während zugleich $\Delta\varepsilon_p$ positiv, daher

$$\mathcal{E}_p < \mathcal{E}_{p0}$$

ist. Diese beiden Fälle können natürlich nur dann eintreten, wenn der Querschnitt des Nullleiters kleiner ist als derjenige der Aussenleiter und zugleich die Belastung der einen Systemhälfte wesentlich kleiner als die der anderen.

132. Einfluss des Mittelleiterquerschnitts.

Ferner folgt aus der Fig. 140, dass ε_0 überall verschwinden würde, falls einer Stromentnahme i_p stets an derselben Stelle eine Stromentnahme i_n von gleicher Grösse gegenüberstände. In diesem Falle könnte der ganze zulässige Spannungsverlust $2\varepsilon_2 = \varepsilon$ in einer Aussenleitung verzehrt werden,

und die Nullleitung könnte ganz fehlen oder, falls wegen geringer, in der Fabrikation begründeter Stromverschiedenheiten der Verbrauchsapparate eine Ausgleichsleitung erwünscht wäre, einen sehr kleinen Querschnitt erhalten. Ebenso würde sich der Spannungsverlust im Nullleiter nach aussen ganz aufheben, wenn, wie in Fig. 141, Stromabnahmen der einen Systemhälfte von gleichen Stromentnahmen der anderen Hälfte in gleichen Abständen eingeschlossen wären, da einem positiven Spannungsverlust $\varepsilon_{0_{II,I}}$ ein gleich grosser negativer Spannungsverlust folgt. Dagegen würde eine wechselständige Anordnung gleicher Stromverbraucher, wie in Fig. 142, offenbar stets Spannungsverluste von gleicher Richtung im Nullleiter erzeugen, die sich zu einander addieren und daher gerade am Ende der Linie, wo auch in den Aussenleitern der grösste Spannungsverlust auftritt, ungünstig wirken.

Nun werden aber die Kosten der Leitungsanlage eines Dreileitersystems um so geringer sein, je geringer der Verlust im neutralen Leiter ist, da ja dann ein um so grösserer Verlust in den Aussenleitern zulässig ist. Man hat also in Dreileiteranlagen dafür zu sorgen, dass der Mittelleiter möglichst geringe Ströme führt, die in den verschiedenen Teilen des Kabels nicht in gleicher Richtung verlaufen. Bei Centralen geschieht dies in der Weise, dass nicht nur alle Anschlüsse nach dem Dreileitersystem

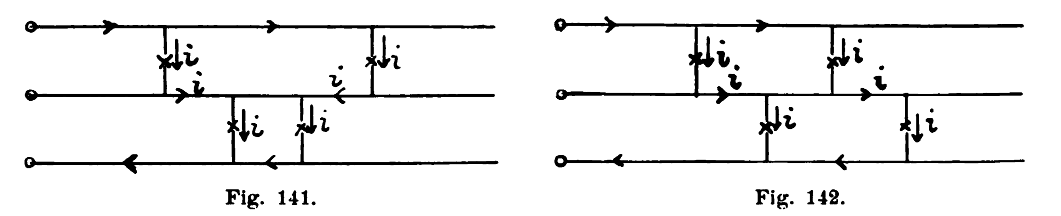


Fig. 141. Fig. 142.

ausgeführt werden, sondern auch die zu gleicher Zeit in Betrieb befindlichen Nutzwiderstände möglichst gleichmässig auf die beiden Systemhälften verteilt werden, damit auch bei Belastungsschwankungen stets die gleiche Verteilung gewahrt wird. Nur ganz kleine Anlagen werden nach dem Zweileitersystem ausgeführt und abwechselnd an die beiden Netzhälften angeschlossen. Aber auch bei diesen führt man von dem Verteilungsnetz aus alle drei Leiter zum Zähler, um gegebenenfalls, wenn sich eine ungleichmässige Belastung der beiden Netzhälften herausstellen sollte, eine Umschaltung vornehmen zu können.

Diese Betrachtungen lassen erkennen, dass es unmöglich ist, eine Querschnittsberechnung des Mittelleiters, etwa unter Zugrundelegung eines bestimmten Teils des zulässigen Spannungsverlustes durchzuführen. In der Praxis verfährt man daher in der Weise, dass man die normale Belastung beider Netzhälften als gleich annimmt und nun die sämtlichen Berechnungen wie an einem Zweileiternetz von der (doppelten Zweileiter-) Spannung $E = 2\,E_2$ durchführt, dem Mittelleiter aber einen durch praktische Erwägungen bestimmten Querschnitt erteilt, und zwar hat es sich gezeigt, dass für ihn ein Querschnitt gleich 0·25 bis 0·50 desjenigen der Aussenleiter, die nach dem Vorhergehenden und gemäss Abschnitt [38] gleich zu wählen sind, genügt.

133. Zulässiger Spannungsverlust beim Dreileitersystem.

Der zulässige Spannungsverlust einer Anlage hängt, wie wir gesehen haben, von den möglichen Spannungsschwankungen infolge der Belastungsänderungen ab und soll im ganzen 3 bis 4 % der Nutzspannung bezw. im

Verteilungsnetz allein 2 % nicht übersteigen. Wir schliessen nun von vornherein den praktisch unmöglichen bezw. leicht zu vermeidenden Fall aus unsern Betrachtungen aus, dass die eine Netzhälfte vollständig entlastet sei, während die andere ihre volle Belastung hat, indem wir gemäss dem Vorhergehenden eine so gleichmässige Verteilung der Belastung voraussetzen, dass auch bei den vorkommenden Belastungsschwankungen möglichst gleiche Ströme in den beiden Aussenleitern fliessen. Andererseits aber dürfen wir wiederum nicht voraussetzen, dass unter allen Belastungsverhältnissen der Mittelleiter stromlos ist; dies wäre eine gar zu günstige Annahme, die praktisch ebenfalls unzutreffend wäre. Da nun eine eigentliche Berechnung der Stromverteilung und damit auch des Spannungsverlustes im Mittelleiter nicht angängig ist, so nimmt man auf Grund empirischer Erfahrungen im Betriebe an, dass ein Dreileiternetz dann die einem Zweileiternetz entsprechende Elastizität besitzt, wenn der Spannungsverlust in einem Aussenleiter etwa gleich $^3/_4$ des gesamten Zweileiterverlustes ist. Es wird also für das Verteilungsnetz

$$\varepsilon = 0{\cdot}015\ \mathcal{E}$$

zu setzen sein, falls wir

$$\varepsilon_2 = 0{\cdot}02\ \mathcal{E}_2$$

als Norm betrachten [**126**], und für die Speiseleiter

$$\varepsilon_s = 0{\cdot}75\ \varepsilon_{2s},$$

wenn ε_{2s} der für Zweileiteranlagen von der Spannung $E_2 = 2\ \mathcal{E}$ ermittelte Speiseleiterverlust ist.

134. Wahl des Mittelleiterquerschnitts.

Diese Festsetzungen geben uns ein Mittel für die genauere Wahl des Querschnittsverhältnisses des Nullleiters an die Hand, indem wir berechnen,

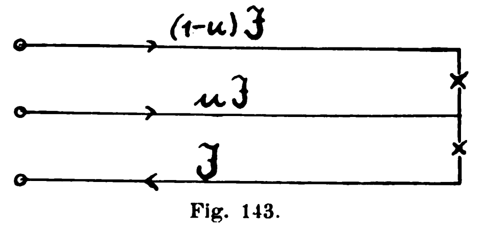


Fig. 143.

wie gross der den letzteren durchfliessende Differenzstrom im Vergleich zur ganzen Belastung, wie gross also die Belastungsverschiedenheit beider Hälften sein darf, damit die volle Spannungsschwankung von 2 % der Nutzspannung erreicht wird. Bezeichnen wir das Querschnittsverhältnis der Leiter mit k, den Belastungsunterschied beider Systemhälften mit uJ (Fig. 143), wobei wir den ungünstigsten Fall voraussetzen, nämlich dass eine der nur am Ende belasteten Hälften den vollen Strom zu leisten hat, setzen wir also

$$q = k q_0 \text{ und } J_0 = u J,$$

so wird

$$\varepsilon_0 = \frac{J_0 l}{q_0}\varrho = \frac{J l \varrho}{q} k u = k u \varepsilon$$

$$\varepsilon_p = (1 - u)\,\varepsilon$$

$$\varepsilon_n = \varepsilon.$$

Der Spannungsverlust der negativen Hälfte darf also

$$\varepsilon_0 + \varepsilon_n = (ku + 1)\,\varepsilon = \frac{4}{3}\,\varepsilon$$

betragen, da ja ε nur 1·5 % von $\mathcal{E}$ ausmacht. Dies ist aber der Fall für

$$u = \frac{1}{3k}$$

d. h. bei

$$\begin{aligned} k &= 1 \text{ für } u = 33\,\% \\ k &= 2 \quad " \quad u = 17 \;" \\ k &= 3 \quad " \quad u = 11 \;" \\ k &= 4 \quad " \quad u = 8 \;" \end{aligned}$$

Wenn also die Schwankungen der Belastung einer Hälfte durch sorgfältige Verteilung der Lampen auf 8, 11, 17 und 33 % (bezw. auf 4, 6, 8 und 16 % bezogen auf die Gesamtbelastung) herabgedrückt werden können, so darf der Querschnitt des Nullleiters $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{1}$ des Aussenleiterquerschnitts betragen. Hierbei ist allerdings vorausgesetzt, dass gleichzeitig der Spannungsverlust der positiven Netzhälfte nicht kleiner als Null werden kann, da ja anderenfalls die Spannungsschwankungen grösser als 2 % von $\mathcal{E}$ werden würden. Dass dies nicht der Fall ist, zeigt die Gleichung des Spannungsverlustes der positiven Hälfte:

$$\varepsilon_p - \varepsilon_0 = (1 - u - ku)\,\varepsilon.$$

Dieser Wert kann nur negativ werden, falls

$$u\,(1 + k) > 1$$

oder

$$k > \frac{1}{u} - 1.$$

Diese Ungleichung ist aber für die berechneten Werte von u nicht erfüllt.

Je grösser nun die Anlage ist, desto leichter ist es natürlich, die Verteilung so vorzunehmen, dass bei allen Belastungen der Strom im Mittelleiter gering ist, da ja die Anschlusswerte im Verhältnis zu den Leiterströmen dann um so kleiner sind. Man wird also in grossen Anlagen bezw. in denjenigen Teilen einer Anlage, die stärker belastet sind, einen kleineren, in kleinen Anlagen einen grösseren Mittelleiterquerschnitt wählen. Im allgemeinen nimmt man im Verteilungsnetz

$$q_0 = \frac{1}{3} \text{ bis } \frac{1}{2}\,q,$$

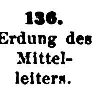
bei den Speiseleitern

$$q_0 = \frac{1}{4}\,q$$

an. Die Praxis hat allgemein bestätigt, dass bei diesen Querschnitten das Dreileiternetz thatsächlich die gleiche Elastizität besitzt, wie das Zweileiternetz, vorausgesetzt, dass die Verteilung der Belastung auf die beiden Netzhälften sorgfältig vorgenommen und im Betrieb ständig überwacht wird.

135. Sicherung des Mittelleiters.

Mittelleiter von Mehrleitersystemen dürfen nach den Sicherheitsvorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker weder Schalter noch Sicherungen enthalten. Der Grund hierfür ist aus Fig. 144 leicht ersichtlich. Denken wir uns den Nullleiter von der Stromquelle abgetrennt, sind also die beiden Netzhälften ohne Ausgleichsmöglichkeit in Reihe geschaltet, so verteilt sich die gesamte Spannung E proportional zu den Widerständen r_p und r_n der eingeschalteten Verbraucher. Ist die Zahl dieser in beiden Netzhälften sehr verschieden, so dass etwa r_p sehr klein und r_n gross wird, so würde die Spannung an den Lampen der negativen Hälfte stark ansteigen und die letzteren würden, vielfach unter explosionsartigen Erscheinungen, der Zerstörung anheimfallen. Besässe nun der Mittelleiter seinem geringeren Querschnitte entsprechend schwächere Sicherungen als die Aussenleiter, so würden bei einem Erd- oder Kurzschluss des Null- und eines Aussenleiters fast stets nur die Sicherungen des ersteren abschmelzen und Anlass zu der beschriebenen ungleichmässigen Spannungsverteilung geben.



136. Erdung des Mittelleiters.

Die Erfahrung in Gleichstromcentralen hat vielfach bestätigt, dass die theoretisch infolge elektrolytischer Wirkung drohende Verschlechterung der Isolation der negativen Leiter thatsächlich in kurzer Zeit eintritt. Es ist

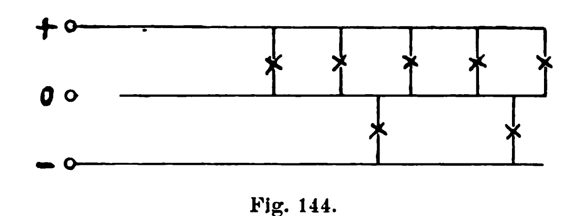


Fig. 144.

deshalb unmöglich oder doch ausserordentlich schwierig, ein selbst vorzüglich isoliertes Leitungsnetz dauernd in gutem Isolationszustande zu erhalten, und es ist daher frühzeitig[1]) der Vorschlag gemacht und im Centralenbau praktisch ausgeführt worden, den Mittelleiter zu erden bezw. durch die Bleimäntel der Aussenleiter zu ersetzen. In diesem Falle ist auch in den Hausanlagen der Mittelleiter blank zu verlegen und thunlichst überall durch Lötverbindungen mit der Gas- und Wasserleitung in Berührung zu bringen. Man erreicht dadurch die folgenden Vorteile:

1. Erniedrigung des Potentials der Anlage gegen Erde auf die Hälfte, da bei nicht geerdetem Mittelleiter sich der negative Pol an Erde legen würde. Daher tritt bei Kurzschlüssen nur der vierte Teil der Energie in Wirksamkeit.
2. Isolationsfehler des Netzes zeigen sich selbstthätig an, indem sie schnell zu Kurzschlüssen anwachsen und die nächsten Bleisicherungen zum Schmelzen bringen. Dadurch wird vermieden, dass Erdschlüsse längere Zeit bestehen bleiben und durch ihre Wirkung auf Telephonleitungen Störungen hervorrufen oder durch Funkenbildung an der

---

1) Der Vorschlag des blanken Mittelleiters ist bereits in der Patentschrift HOPKINSONS (s. Fussnote 1, S. 225) enthalten. In Deutschland wurde die Erdung des Mittelleiters zuerst von HERMANN MÜLLER vorgeschlagen und begründet. ETZ 1890, S. 283, Ersatz des Mittelleiters . . . Vgl. auch die regen Kontroversen über Nutzen oder Schädlichkeit der Erdung des Mittelleiters in den Jahrgängen 1892 bis 1895 der ETZ, sowie im Elektrotechnischen Anzeiger 1905.

Stromübergangsstelle oder durch dauernde Erwärmung, wenn der Widerstand des Erdschlusses bedeutend ist, Brandschäden verursachen können.

3. Die Ausdehnung der Störungsgebiete von Erdschlüssen wird eingeschränkt, da jeder Erdverbindung eines Aussenleiters in nächster Nähe der blanke Nullleiter gegenüber steht.
4. Geringere Kosten der Anlage.

Schon die ersten Anlagen mit blankem Mittelleiter zeitigten die Erfahrung, dass die Bleiumhüllung der Aussenleiter angefressen wurde, und dass unter der Einwirkung elektrolytischer und chemischer Einflüsse im Erdreich der Querschnitt des Mittelleiters geschwächt und in Einzelfällen ganz zerstört wurde. Diese üblen Wirkungen werden dadurch vermieden, dass der Nullleiter entweder verzinnt oder durch einen Anstrich oder eine Isolationsschicht gegen die Bodeneinflüsse gesichert wird und durch gelötete Verbindungen (Schellen) mit den Bleimänteln beider Aussenleiter und mit guter Erde (Wasser-, Gas- oder besondere Erdleitung) sowohl in der Centrale als auch in den Kabelkästen und sonst an möglichst vielen Stellen des Netzes elektrischen Kontakt erhält. Der weitere Nachteil, dass eine Fehlerkontrolle[1]) während des Betriebes bei geerdetem Mittelleiter unthunlich ist, gilt auch für nicht geerdeten Nullleiter, da ja, wie bereits erwähnt, nach kurzer Zeit der negative Leiter stets Erdschluss zeigt.

Kann dagegen von vorn herein durch peinlichste Kontrolle des Isolationszustandes eines neu verlegten Netzes und durch sofortige Beseitigung auch kleinerer Isolationsfehler eine gute Netzisolation gewährleistet werden, so empfiehlt es sich, nach einem Vorschlage von ERENS,[2]) den Mittelleiter isoliert zu verlegen und nur an einer Stelle, nämlich in der Centrale, durch eine gute Erdverbindung unter Zwischenschaltung eines Strommessers zu erden, da bei dieser Anordnung auch während des Betriebes eine ständige Messung des Isolationswiderstandes der Aussenleiter ermöglicht wird, allerdings nur solange, als der Nullleiter selbst frei von Erdschluss ist.

Das Fünfleitersystem.

137. Erweiterung der Ergebnisse auf das Fünfleitersystem.

Die Erweiterung des Dreileitersystems durch weitere Reihenschaltung von Zweileitersystemen würde zum Vier-, Fünfleitersystem u. s. w. führen. Wie bereits erwähnt, ist von diesen nur das Fünfleitersystem ausgeführt worden, wenn auch bei weitem nicht in dem Umfange wie Dreileiteranlagen. Man kann also das Fünfleitersystem als Reihenschaltung von vier Zweileiter- oder auch von zwei Dreileiteranlagen auffassen (Fig. 145).

Auch in diesem System wird die Strom- und Spannungsverteilung und der Querschnitt der Aussenleiter so berechnet, als ob eine Zweileiteranlage

---

1) Über Fehlerkontrolle in Leitungsnetzen s. O. FRÖHLICH, Über Isolations- und Fehlerbestimmungen an elektrischen Anlagen, Halle a. S. 1895, sowie ETZ 1893, S. 48. Ferner M. KALLMANN, Über Einrichtungen zur dauernden Kontrolle ... ETZ 1893, S. 155; ETZ 1898, S. 683. TH. BRUGER, Isolationsmessungen ... ETZ 1902, S. 901. E. MÜLLENDORFF, Die Bestimmung des Isolationswiderstandes ... ETZ 1896, S. 661; ETZ 1902, S. 1080.

2) FR. ERENS: Zur Frage des blanken oder isolierten Mittelleiters. ETZ 1905, S. 900. Vgl. auch B. SOSCHINSKI: Zur Frage ... ETZ 1905, S. 1128.

von der vierfachen Spannung mit hintereinander geschalteten Lampenreihen von je vier vorläge. Die Stromstärke in den Aussenleitern beträgt also hier den vierten Teil, der Spannungsverlust das vierfache einer Zweileiteranlage von gleicher Lampenspannung. Auch hier wird die Wahl der Querschnitte

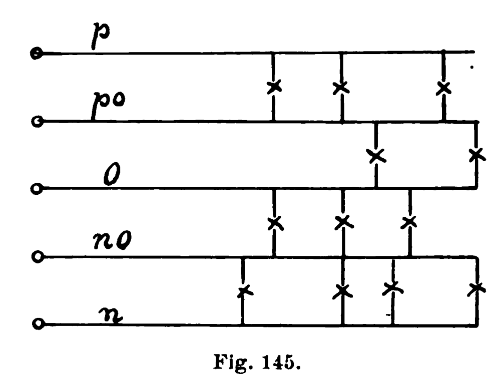


Fig. 145.

der Mittelleiter nach empirischen Erfahrungen bestimmt, und zwar wählt man

$$(q_p = q_n) : (q_{p0} = q_{n0}) : q_0 = 4 : 2 : 1$$

und nimmt dann bei einem Spannungsverlust von

$$\varepsilon = 0{\cdot}015\ \mathcal{E}$$

in den Aussenleitern an, dass die Elastizität des Systems gleich derjenigen einer Zweileiteranlage von der vierfachen Lampenspannung mit dem Spannungsverlust

$$\varepsilon_2 = 0{\cdot}02\ \mathcal{E}_2$$

ist. Auch hier dürfen die Mittelleiterquerschnitte stark belasteter Speisekabel etwas geringer bemessen werden.

Die Mehrphasensysteme.

138. Die Mehrleitersysteme bei Wechselstrom.

Dass das Drei- und Fünfleitersystem bei Gleich- und Wechselstrom in gleicher Weise verwendbar ist, liegt auf der Hand, nur wird man bei letzterem weniger häufig davon Gebrauch machen, da ja die verwendbaren Nutzspannungen hier nicht durch die erreichbaren Glühlampenspannungen begrenzt sind. Man kann die in den Fernleitungen und im Hochspannungsnetz benutzte hohe Spannung auf einfachstem Wege durch Transformatoren auf jede beliebige Grösse herabsetzen, ohne die mit dem Gebrauch von Mehrleitersystemen unstreitig verbundenen Komplikationen der Netz- und Lampenanordnung in den Kauf nehmen zu müssen. In der That ist auch das Fünfleitersystem überhaupt nicht, das Dreileitersystem nur dort in Wechselstromanlagen ausgeführt worden, wo grosse Energiemengen auf zu bedeutende Querschnitte der Verteilungsleiter führen würden.

Dagegen sind aus anderen Gründen Mehrleitersysteme für Wechselstromanlagen eingeführt worden, die nur für diese Stromart verwendet werden können, nämlich die Mehrphasenströme. Während die Mehrleitersysteme beim

Gleichstrom aus der Notwendigkeit entsprangen, den Speisebereich durch Spannungserhöhung ökonomisch erweitern zu müssen, entstanden die Wechselstrommehrphasensysteme aus den bekannten Mängeln und Schwierigkeiten, die sich der Verwandlung der elektrischen in mechanische Energie vermittels des Wechselstromeinphasenmotors entgegenstellen, der infolge seines oszillierenden magnetischen Feldes nur die Inbetriebsetzung bei unbelastetem Zustande gestattet oder teurer und schwerfälliger Anlaufsmechanismen benötigt. In jedem Falle aber entnimmt er dem Netz einen ausserordentlich starken Anlaufsstrom, wodurch wiederum Spannungsschwankungen und Störungen im Lichtbetrieb hervorgerufen werden. Erst in neuester Zeit ist in dieser Hinsicht ein Fortschritt zu verzeichnen durch den praktischen Ausbau der Kollektormotoren für Einphasenstrom, da es gelungen ist, das Feuern des Kollektors und den übermässig hohen Anlaufsstrom bei belastetem Motor zu beseitigen und ihm derartige Abmessungen zu geben, dass auch Wirkungsgrad und Leistungsfaktor befriedigen.

Da die Mehrphasenströme hingegen in einem Motor ein rotierendes Feld erzeugen, so war von vornherein der Bau von gutwirkenden, dem Gleichstrommotor gleichwertigen Kraftmaschinen einfach. Dies und die Transformierbarkeit sicherten daher den ersteren bei Energieübertragungen auf weite Entfernungen unbedingt den Vorzug sowohl vor dem Gleichstrom als auch vor dem einphasigen Wechselstrom. Man nahm gern dafür den Nachteil der dritten Leitung und die Komplikation der Stromverteilung bei Beleuchtungsanlagen in den Kauf.

139. Drehstromsystem. Auch bei den Drehstromnetzen[1]) wird, wie bei den Dreileiternetzen, gleiche Verteilung der Belastung auf die drei Phasen vorausgesetzt, so dass auf jede Phase ein Drittel der gesamten zu liefernden Energie entfällt. Sind also die Belastungen $\mathfrak{E}$ in Watt gegeben, so berechnen sich die auf jeden einzelnen Leiter bezüglichen Stromentnahmen sowohl bei Dreieck- als bei Sternschaltung der Verbrauchsapparate aus der Beziehung

$$\frac{1}{3}\,\mathfrak{E} = \frac{1}{3}\,E i \cos\varphi \sqrt{3} = \mathcal{E} i \cos\varphi,$$

wenn, wie stets, E die Linienspannung, also

$$\mathcal{E} = \frac{1}{\sqrt{3}}\,E$$

das Potential der Leitung bedeutet. Für die Bemessung der Leitungen ist also, abgesehen von der Wahl des zulässigen Spannungsabfalls, über den die Elastizität des Netzes [140] entscheidet, den Abschnitten [107 ff.] nichts hinzuzufügen. Es ist nur zu beachten, dass bei den Niederspannungsnetzen, in denen die Spannung der Glühlampen ausschlaggebend ist, bei Dreieckschaltung E, bei Sternschaltung dagegen $\mathcal{E}$ gleich der Lampenspannung wird. Da ferner bei Voraussetzung einer Belastung mit Glühlampen grössere

1) Die Theorie der Mehrphasenströme wird hier als bekannt vorausgesetzt. Eine eingehende Darstellung derselben s. M. v. DOLIVO-DOBROWOLSKY, Kraftübertragung mittels Wechselströmen von verschiedener Phase, ETZ 1891, S. 149. L. FISCHER, Zur Berechnung von Mehrphasenstromanlagen, ETZ 1895, S. 80. J. TEICHMÜLLER, Elastische Drehstromleitungen, ETZ 1902, S. 1, sowie auch die Lehrbücher von KAPP, THOMSON, TESLA u. a.

oder kleinere Belastungsschwankungen in den drei Zweigen nicht zu vermeiden sind, so folgt, dass, ähnlich wie bei dem Dreileitersystem, bei Sternschaltung eine Ausgleichsleitung vorzusehen ist, die die Nullpunkte der Belastungsgruppen mit dem neutralen Punkte der Energieerzeuger verbindet, um ungleiche Verteilung der Nutzspannung E auf die drei Zweige des Systems zu verhindern [135]. Im allgemeinen ist also das Drehstromsystem in Sternschaltung stets als Vierleitersystem auszubilden; nur wenn ausschliesslich Motoren die Belastung des Netzes bilden, ist eine Verlegung von nur drei Leitern angängig, da in diesem Falle unter allen Belastungsverhältnissen Gleichheit der Stromverteilung in allen drei Zweigen gewahrt ist.

140. Die Elastizität und der zulässige Spannungsabfall in Drehstromnetzen. Dreiecksschaltung der Stromempfänger.

Um uns über die möglichen Spannungsschwankungen einer in Dreieck geschalteten Drehstromanlage einen Anhalt zu schaffen, setzen wir eine einzige Belastung am Ende einer Linie voraus, die zu gleichen Teilen auf die drei Phasen geschaltet ist. In Fig. 146 ist das Schaltungsschema in vereinfachter und ausführlicher Form dargestellt.

Sind zunächst die Belastungen induktions- und kapazitätsfrei, so dass der Strom i_Δ in Phase mit der Nutzspannung E ist, so erhalten wir für volle

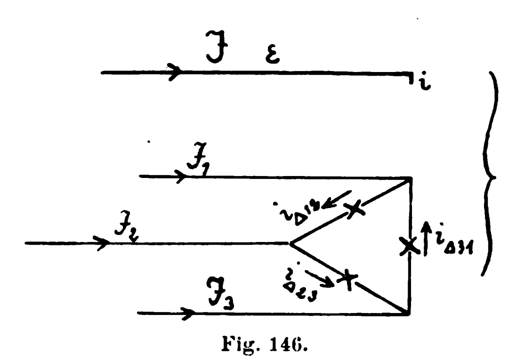


Fig. 146.

Belastung das in Fig. 147 in stark ausgezogenen Linien dargestellte Diagramm der Ströme und Spannungsverluste, wenn wir den Massstab der letzteren so wählen, dass der maximale Spannungsabfall ε, der ja phasengleich mit dem Leitungsstrom J ist, auch gleiche Länge wie J besitzt. Denn es ist

$$\dot{J}_1 = \dot{i}_{\Delta 12} - \dot{i}_{\Delta 31} = i_\Delta \sqrt{3} = i$$
$$\dot{J}_2 = \dot{i}_{\Delta 23} - \dot{i}_{\Delta 12} = i_\Delta \sqrt{3} = i$$
$$\dot{J}_3 = \dot{i}_{\Delta 31} - \dot{i}_{\Delta 23} = i_\Delta \sqrt{3} = i$$

und ferner der Spannungsabfall in den einzelnen Phasen:

$$\dot{\varepsilon}_{12} = \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon \sqrt{3}$$
$$\dot{\varepsilon}_{23} = \dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon \sqrt{3}$$
$$\dot{\varepsilon}_{31} = \dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon \sqrt{3}.$$

Der Spannungsverlust ist hier gleich dem Spannungsabfall, da die Linienspannung E gleiche Phase mit i_Δ, also auch mit $\varepsilon \sqrt{3}$ hat.

Nehmen wir nun an, dass zunächst die Belastung einer Phase, etwa $i_{\Delta 23}$ bis Null abnimmt, so nimmt der Vektor J_2 bis zur Grösse $- i_{\Delta 12}$ ab

und dreht sich zugleich bis in die Lage von $-i_{\Delta 12}$; gleichzeitig nimmt ε_2 ab und erhält schliesslich die Grösse und Lage des Vektors $-i_{\Delta 12}$: der Punkt 2 wandert nach 7. Zugleich bewegt sich auch Punkt 3 nach 8, da

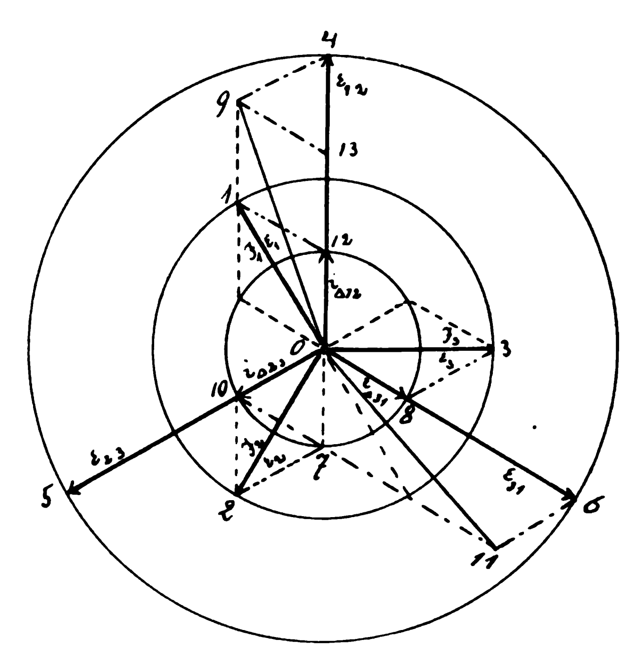


Fig. 147.

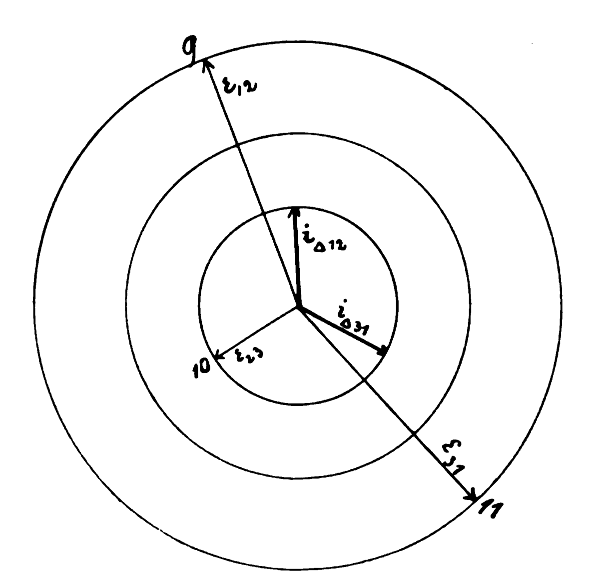


Fig. 148.

auch $-i_{\Delta 23}$ verschwindet. Die Vektoren J_1 und ε_1 dagegen ändern sich nicht. Für die drei Vektoren ε_{12}, ε_{23} und ε_{31} ergeben sich daher die folgenden Änderungen: Der Punkt 4 wandert nach 9 (09 = 01 — 07), 5 nach 10

(0 10 = 07 — 08) und 6 nach 11 (0 11 = 08 — 01). Für $i_{\Delta 23} = 0$ (bezw. sehr klein) wird also der Spannungsabfall in den drei Phasen (Fig. 148):

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{31} = 1{\cdot}53\ \varepsilon$$

$$\varepsilon_{23} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{3}} = 0{\cdot}577\ \varepsilon.$$

Die grösste Änderung erleidet also der Vektor ε_{23}, und zwar ist bei ihm der Spannungsabfall zugleich Spannungsverlust, da er die Richtung der Spannung E_{23} hat.

Lassen wir weiterhin auch $i_{\Delta 31}$ zu Null abnehmen, so wird $J_3 = 0$ (Fig. 147), also auch $\varepsilon_3 = 0$: der Punkt 8 des Vektors ε_3 wandert von 8 nach 0; der Endpunkt des Vektors J_1 wandert von 1 nach 12, J_1 erhält also die Grösse $i_{\Delta 12}$, während J_2, wie vorher, gleich $- i_{\Delta 12} = 07$ bleibt. Ebenso wandert der Endpunkt von ε_1 von 1 nach 12 und ε_2 behält die Lage 07. Daher bewegt sich der Endpunkt von ε_{31} auf der Geraden 11 7 nach Punkt 7, derjenige von ε_{23} von 10 nach 7, während der Endpunkt von ε_{12} von 9 nach 13 wandert.

Ist also nur eine der drei Phasen (12) vollständig belastet, während die beiden anderen ganz entlastet oder nur schwach belastet sind, so wird der Spannungsabfall (Fig. 149):

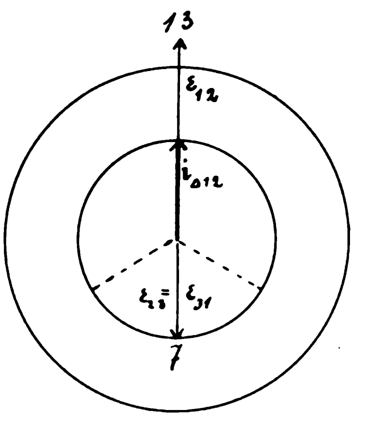


Fig. 149.

$$\varepsilon_{12} = \frac{2}{\sqrt{3}}\ \varepsilon$$

$$\varepsilon_{23} = \varepsilon_{31} = \frac{1}{\sqrt{3}}\ \varepsilon.$$

Zugleich aber hat sich der Spannungsverlust der Phase 23 (und 31) weiter vermindert, denn die Vektoren des Spannungsabfalls und der Spannung bilden jetzt einen Winkel von 60°, der Spannungsverlust ist also

$$\Delta E_{23} = \Delta E_{31} = \frac{1}{\sqrt{3}}\ \varepsilon \cos 60^0 = \frac{1}{2\sqrt{3}}\ \varepsilon = 0{\cdot}288\ \varepsilon.$$

Wie ersichtlich, kann bei der Dreiecksschaltung von Drehstromanlagen, ähnlich wie bei Zweileiteranlagen, der Spannungsverlust mit Entlastung der Leitungen nur abnehmen, ohne jemals negativ werden zu können; die grössten Spannungsschwankungen sind also durch den Spannungsabfall selbst gegeben und dieser kann daher den grössten Wert erhalten, den wir als zulässig befunden haben, nämlich die Grösse

$$\varepsilon \sqrt{3} = 0{\cdot}02\ E;\ \text{ d. h. } \varepsilon = 0{\cdot}02\ \mathcal{E}.$$

Ist die Belastung induktiv, so dass der Stern der Ströme i_Δ gegen den Stern der Spannungen E um einen Winkel φ verschoben erscheint, so tritt bei voller Belastung aller drei Zweige anstatt des bisher phasengleichen Spannungsabfalls ε_{12}, ε_{23} und ε_{31} ein Spannungsabfall auf, der mit i_Δ phasengleich ebenfalls um φ gegen E verschoben ist; daher wird, wie wir bereits

im Abschnitt [57] gesehen haben, der Spannungsverlust im Verhältnis von $\cos\varphi$ kleiner, d. h. der Spannungsabfall kann für gleichen Spannungsverlust im Verhältnis $\frac{1}{\cos\varphi}$ grösser gewählt werden. Dass für teilweise entlastete Phasen die Verhältnisse innerhalb der praktischen Grenzen ähnlich liegen, ist unmittelbar aus den Fig. 148 und 149 zu ersehen.

141. Fortsetzung. Sternschaltung.

Bei Sternschaltung der Verbraucher (Fig. 150) sind die Phasenströme $i_{\curlywedge}$ gleich den Leiterströmen J. Setzen wir wieder induktionsfreie Belastung voraus, so erhalten wir bei entsprechender Wahl des Massstabes für die ε bei gleicher Belastung der drei Phasen das Diagramm der Fig. 151 (stark ausgezogene Linien). Hier ist der für das Funktionieren der Lampen massgebende Spannungsverlust derjenige einer Phase, er setzt sich also aus dem Spannungsabfall einer Aussenleitung und des Nullleiters zusammen. Da der Spannungsabfall als phasengleich mit der Phasenspannung $\mathcal{E}$ angenommen wurde, so kommt er auch hier vollständig als Spannungsverlust zur Geltung.

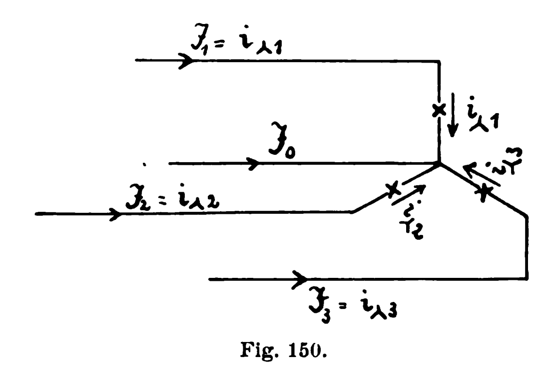


Fig. 150.

Die Nullleitung, deren Querschnitt wir gleich dem der Aussenleiter annehmen, ist zunächst stromlos, also ist

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{10}, \; \varepsilon_2 = \varepsilon_{20}, \; \varepsilon_3 = \varepsilon_{30}$$

der gesamte Spannungsverlust der drei Phasen. Er beträgt, wie ein Vergleich der in gleichem Massstab gezeichneten Fig. 151 und 147 lehrt, für gleiche Ströme

$$i_{\curlywedge} = i_{\Delta} \text{ (also für } E_{\curlywedge} = \sqrt{3}\, E_{\Delta})$$

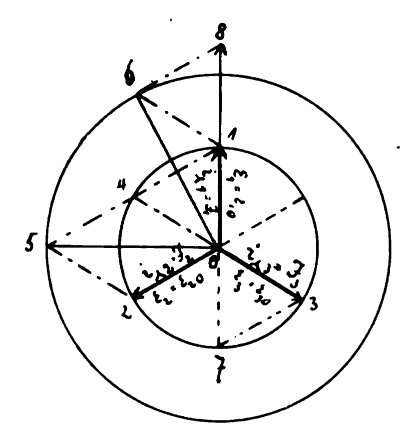
nur ein Drittel des Spannungsverlustes bei Dreieckschaltung.

Vermindert sich jedoch die Belastung einer Phase, so entsteht ein der Differenz gleicher und gleichgerichteter Strom in dem Ausgleichsleiter; nimmt auch die Belastung einer zweiten Phase ab, so ist der Nullleiterstrom der Phase und Grösse nach die geometrische Summe beider Differenzen. Lassen wir also zunächst z. B. den Strom $i_{\curlywedge 3}$ bis auf Null abnehmen, so vermindert sich auch ε_3 bis Null, dagegen entsteht ein ε_3 gleichgerichteter von 0 bis $\varepsilon_3 = 03$ anwachsender Spannungsabfall im Nullleiter, der, im negativen Sinne geometrisch zum Spannungsabfall der drei Aussenleiter addiert, nunmehr den Phasenspannungsabfall ergiebt. Es wandert also der Endpunkt des Vektors ε_{30} von 3 über 0 nach 4, derjenige von ε_{20} von 2 nach 5 und von ε_{10} von 1 nach 6. Bei vollständiger Entlastung einer Phase (Fig. 152) ist also

der Spannungsabfall von Phase 1 und 2 gewachsen, derjenige von Phase 3 hat bei gleicher Grösse seine Richtung um 180° geändert. Es ist daher:

$\varepsilon_{10} = \sqrt{3}\,\varepsilon = \varepsilon_{20}$ und der Spannungsverlust $\Delta\,\mathfrak{E}_{10} = \sqrt{3}\,\varepsilon \cos 30^0 = 1{\cdot}5\,\varepsilon = \Delta\,\mathfrak{E}_{20}$

$\varepsilon_{30} = \varepsilon$ „ „ „ $\Delta\,\mathfrak{E}_{30} = \varepsilon \cos 180^0 = -\varepsilon$.



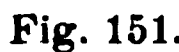


Fig. 151.

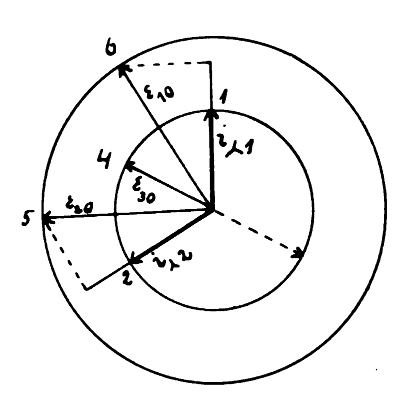


Fig. 152.

Nimmt auch $i_{\lambda 2}$ auf Null ab, so bewegt sich der Endpunkt des Vektors 03 $= J_0 = \varepsilon_0$ von 3 nach 7 und die (geometrische) Subtraktion dieses Spannungsabfalls von demjenigen der Aussenleiter lässt die Vektorendpunkte 6 nach 8,

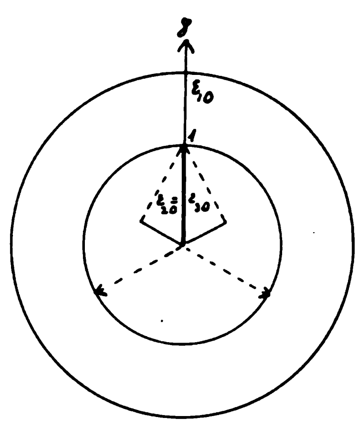


Fig. 153.

5 und 4 nach 1 wandern, so dass das Diagramm der Fig. 153 entsteht. Es ist also jetzt

$\varepsilon_{10} = 2\,\varepsilon$ und der Spannungsverlust $\Delta\,\mathfrak{E}_{10} = 2\,\varepsilon$

$\varepsilon_{20} = \varepsilon_{30} = \varepsilon$ „ „ „ $\Delta\,\mathfrak{E}_{20} = \Delta\,\mathfrak{E}_{30} = \varepsilon \cos 120^0 = -0{\cdot}5\,\varepsilon$.

Die grösste Änderung, die der Spannungsabfall und der Spannungsverlust bei allen möglichen Belastungsänderungen durchmachen können, ist demnach

$$2\,\varepsilon \;(\sphericalangle\,[\mathfrak{E}\varepsilon] = 0^0) \text{ bezw. } + 2\,\varepsilon,$$

wenn z. B. Phase 1 voll belastet, die beiden anderen Phasen unbelastet sind, und

$$\varepsilon\ (\sphericalangle\ [\mathfrak{E}\varepsilon] = 180^0)\ \text{bezw.}\ -\varepsilon,$$

wenn Phase 1 unbelastet, dagegen 2 und 3 voll belastet sind. Daher ist eine grösste Schwankung der Nutzspannung um

$$2\varepsilon - (-\varepsilon) = 3\varepsilon$$

theoretisch möglich, wenn auch bei sorgfältiger Verteilung der Lasten auf die drei Phasen praktisch leicht zu vermeiden.

Hat der Nullleiter nur den halben Querschnitt der Aussenleiter, so sind die Spannungsschwankungen noch grösser, denn es wird dann für Fig. 152:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_{20} = \sqrt{7}\,\varepsilon \qquad \Delta\mathfrak{E}_{10} = \Delta\mathfrak{E}_{20} = 2\varepsilon$$
$$\varepsilon_{30} = 2\varepsilon \qquad \Delta\mathfrak{E}_{30} = -2\varepsilon$$

und für Fig. 153:

$$\varepsilon_{10} = 3\varepsilon \qquad \Delta\mathfrak{E}_{10} = 3\varepsilon$$
$$\varepsilon_{20} = \varepsilon_{30} = 2\varepsilon \qquad \Delta\mathfrak{E}_{20} = \Delta\mathfrak{E}_{30} = -\varepsilon.$$

Die grösste Spannungsschwankung beträgt also 5ε.

142. Wahl des Spannungsabfalls und des Nullleiterquerschnitts bei Sternschaltung.

Aus diesen Betrachtungen ist nun die Folgerung zu ziehen, dass wir bei Drehstromnetzen mit Sternschaltung ebenso wenig wie bei den Dreileiternetzen [**133**] einen Spannungsabfall von $\varepsilon = 0{\cdot}02\,\mathfrak{E}$ in den Leitern zulassen dürfen. In der That wählt man in der Praxis ebenso wie bei Dreileiteranlagen als zulässigen Spannungsabfall $1{\cdot}5\,^0/_0$ der Nutzspannung $\mathfrak{E}$. Prüfen wir nun die zulässige Belastungsänderung bezogen auf die volle Elastizität, also für den Gesamtspannungsverlust von $0{\cdot}02\,\mathfrak{E}$ mit Hilfe des gleichen Verfahrens, das wir im Abschnitt [**134**] für das Dreileitersystem angewendet haben, so erhalten wir gemäss Diagramm der Fig. 151, wenn wir zunächst voraussetzen, dass nur eine Phase, etwa 3, um uJ entlastet wird, während die beiden anderen voll belastet bleiben:

$$\Delta\mathfrak{E}_{10} = \Delta\mathfrak{E}_{20} = \varepsilon + uk\varepsilon\cos 60^0 = \varepsilon\left(1 + \frac{1}{2}uk\right)$$
$$\Delta\mathfrak{E}_{30} = \varepsilon\,(1 - u - uk).$$

Die ersten beiden Werte dürfen daher die Grösse $\frac{4}{3}\varepsilon$ erhalten, falls nur der Wert $\Delta\mathfrak{E}_{30}$ positiv bleibt. Es ergeben sich also für u die folgenden beiden Bedingungsgleichungen:

$$u = \frac{2}{3k} \qquad u < \frac{1}{1+k}$$

d. h. für

k	u		u
$k = 1$	$u = 67\,^0/_0$	oder	$u \leq 50\,^0/_0$
2	33 „		33 „
3	22 „		25 „
4	17 „		20 „

Nur für $k = 1$ ist der Wert der zweiten u-Reihe grösser als der der ersten, also wir dürfen demnach $k = 4$, 3, 2 oder 1 annehmen, falls die Belastungs-

änderung einer Phase allein höchstens 17, 22, 33 oder 50 % ihrer Maximalbelastung, d. h. bezogen auf die Gesamtbelastung höchstens 6, 7, 11 oder 17 % erreicht.

Fordern wir dagegen, dass sich zwei Phasen, etwa 2 und 3 gleichzeitig um 100 u % ihrer Volllast ändern sollen, während Phase 1 voll belastet bleibt, so werden für $k = 1$ die Verhältnisse sogar noch günstiger. Denn jetzt ist, wie vorher

$$\Delta \mathcal{E}_{10} = \varepsilon \left(1 + \frac{1}{2} u k\right),$$

dagegen

$$\Delta \mathcal{E}_{20} = \Delta \mathcal{E}_{30} = \varepsilon \left(1 - u - \frac{1}{2} u k\right),$$

also wird

$$u = \frac{2}{3k} \qquad u \leqq \frac{1}{1 + k/2}$$

und für

k	u	oder $u \leqq$
$k = 1$	$u = 67$ %	67 %
2	33 „	50 „
3	22 „	40 „
4	17 „	33 „

also darf für $k = 1$ die Belastungsschwankung zweier Phasen bis 67 % (22 % bezogen auf die Gesamtbelastung) betragen, während für die übrigen Querschnittsverhältnisse die vorher ermittelten Werte bestehen bleiben.

Um nun die bedingte Elastizität des Drehstromnetzes mit der des Dreileiternetzes zu vergleichen, haben wir die jetzt gefundenen zulässigen Belastungsschwankungen mit den entsprechenden des Dreileiternetzes in Beziehung zu setzen, und zwar ist die Vergleichung wohl am einwandfreiesten, wenn man die auf die ganze Belastung bezüglichen Zahlen beider Netze heranzieht. Diese sind:

bei $k =$	4	3	2	1
für Dreileiternetze	4	6	8	16 %
für Drehstrom-Sternschaltung	6	7	11	17 „

also im letzten Fall noch etwas günstiger als im ersten Falle. Hat die Praxis also bei den Dreileiternetzen gezeigt, dass ein Spannungsverlust bezw. Spannungsabfall von 1·5 % der Nutzspannung in den Aussenleitern zu wählen ist, um den Bedingungen der Elastizität bei Querschnitten des Mittelleiters, die $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{2}$ der Aussenquerschnitte betragen, zu genügen, so gilt das gleiche von den Drehstromnetzen mit Sternschaltung, falls für gleich gute Verteilung der Lasten auf die drei Phasen Sorge getragen wird.[1])

143. Zweiphasennetze.

Das Zweiphasensystem besteht bekanntlich aus zwei Einphasensystemen, deren Phasen um 90° gegeneinander versetzt sind. Sind die beiden Phasen nicht miteinander verkettet (Fig. 154), so ist jede Hälfte des Systems mit der Spannung $E = 2\mathcal{E}$ von der anderen vollständig unabhängig und hat die

1) Vgl. hierzu auch TEICHMÜLLER, Elastische Drehstromleitungen, ETZ 1902, S. 1, der infolge eines Irrtums bei der Berechnung der zulässigen Belastungsschwankung in Dreileiternetzen zu anderen Ergebnissen kommt.

Hälfte der Verbraucher zu speisen. Die Berechnung beider Netzhälften findet getrennt für je eine Hälfte der Belastung statt.

Sind dagegen die beiden Phasen miteinander verkettet (Fig. 155), so setzen sich die beiden um 90^0 verschobenen Spannungen $\mathcal{E}$ zur Gesamtspannung $E = \sqrt{2}\, \mathcal{E}$ zusammen, und der Strom im Mittelleiter ist $J_0 = \sqrt{2}\, J$ (Fig. 156 und 157), falls bei gleicher Belastung J der Strom jeder Hälfte ist.

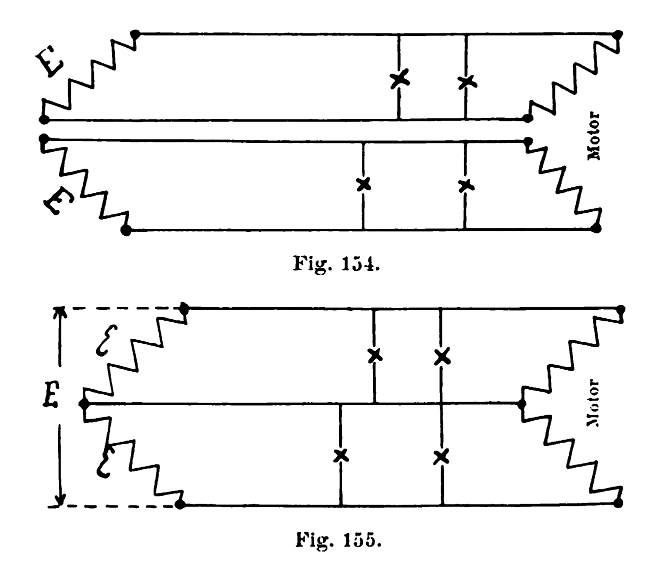


Fig. 154.

Fig. 155.

Man wählt daher vielfach bei diesem in der Praxis wenig benutzten unsymmetrischen System, um gleiche Stromdichten zu erhalten, den Querschnitt des Mittelleiters zu $\sqrt{2}\, q$ (vergl. auch [22]), wenn q der für jede als unabhängig betrachtete Netzhälfte ermittelte Querschnitt ist.

Es fragt sich nun, welcher Spannungsabfall hier zulässig ist. Beschränken wir die Untersuchung auf die Annahme, dass alle drei Leiter den gleichen

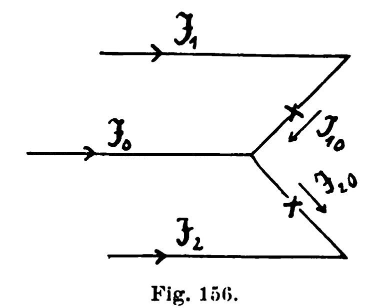


Fig. 156.

Querschnitt erhalten, so wird der Spannungsabfall im Mittelleiter $\varepsilon\sqrt{2}$, wenn ε derjenige der Aussenleiter ist. Wir erhalten also das Diagramm der Fig. 157, wenn wir wieder den Massstab der ε so wählen, dass die Längen der J zugleich den entsprechenden Spannungsabfall darstellen. Es ist nämlich, wenn J_{10} und J_{20} in Phase mit den Spannungen $\mathcal{E}_1$ und $\mathcal{E}_2$ angenommen werden,

$$\dot{J}_1 = \dot{J}_{10};\ \dot{J}_2 = -\dot{J}_{20};\ \dot{J}_0 = \dot{J}_{20} - \dot{J}_{10} = -(\dot{J}_1 + \dot{J}_2)$$

$$\dot{\varepsilon}_{10} = \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_0;\ \dot{\varepsilon}_{20} = \dot{\varepsilon}_0 - \dot{\varepsilon}_2.$$

Dabei wird für volle Belastung beider Zweige:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_{20} = \varepsilon \sqrt{5}; \quad \Delta \mathcal{E}_{10} = \Delta \mathcal{E}_{20} = \sqrt{(\varepsilon \sqrt{5})^2 - \varepsilon^2} = 2\,\varepsilon.$$

Nimmt nun die Belastung der einen Hälfte, etwa J_{20}, zu Null ab, so wandern die Vektorendpunkte 2 und 4 nach 0, 3 nach 7, also 5 nach 8 und 6 nach 7, da ja $\varepsilon_1 = 01$ unverändert bleibt. Demnach wird für sehr kleines J_{20}:

$$\varepsilon_{10} = 2\,\varepsilon_1, \qquad \Delta \mathcal{E}_{10} = 2\,\varepsilon_1,$$
$$\varepsilon_{20} = \varepsilon_1 \qquad \Delta \mathcal{E}_{20} = 0,$$

denn ε_{20} steht senkrecht auf J_{20}. Die grösste Spannungsschwankung kann also selbst bei vollständiger Entlastung einer Netzhälfte nicht mehr als $2\,\varepsilon$

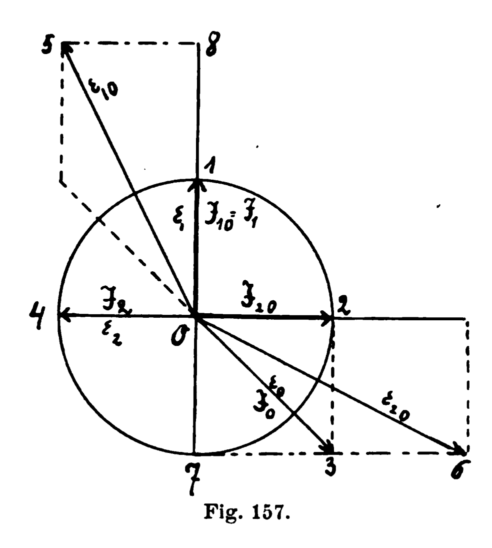


Fig. 157.

betragen, wenn der Mittelleiterquerschnitt gleich demjenigen der Aussenleiter ist. Wir haben demnach für diesen Fall den Spannungsabfall in einem Aussenleiter zu

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot 0{\cdot}02\ \mathcal{E} = 0{\cdot}01\ \mathcal{E}$$

zu wählen und erhalten dann volle Elastizität des Netzes, wie beim Zweileiter und Drehstromsystem in Dreieckschaltung.

Erhält der Mittelleiter den $\sqrt{2}$fachen Querschnitt der Aussenleiter, so ist der Gesamtspannungsverlust bei voller Belastung nur

$$\varepsilon \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{2}\right) = 1{\cdot}71\,\varepsilon,$$

der Spannungsabfall in den Aussenleitern kann also im Verhältnis von $\frac{2}{1{\cdot}71} = 1{\cdot}17$ vergrössert und gleich $0{\cdot}0117\ \mathcal{E}$ gewählt werden.

Vergleich der Metallmengen der verschiedenen Leitungssysteme.

144. Grundlagen des Vergleichs.

Wollen wir die für die verschiedenen Leitungssysteme zu verwendenden Metallmengen und damit, wenigstens angenähert, auch die Kosten der Netze miteinander vergleichen, so haben wir grundsätzlich die Vergleichung der Niederspannungsnetze und der mit Hochspannung betriebenen Fernleitungen zu trennen, da, wie die Entwickelung gezeigt hat, die Berechnung beider auf verschiedenen Grundlagen beruht. Für den Querschnitt der Fernleitungen war ausschliesslich die Wirtschaftlichkeit des Betriebs massgebend gemacht worden, während für Niederspannungsnetze die hierdurch gegebenen Forderungen zurücktreten (bei den Speiseleitungen allerdings nur in beschränktem Masse) und der einen guten Betrieb erst ermöglichenden Bedingung der Elastizität und des Ausgleichs das Feld räumen mussten. Ferner konnten wir die Höhe der Spannung bei den Fernleitungen (und Primärnetzen) von Erwägungen abhängig machen, die ebenfalls auf Erreichung einer möglichst günstigen Wirtschaftlichkeit hinzielten; bei den Niederspannungsnetzen war dagegen von vornherein die grösste Spannung durch diejenige Grenze gegeben, für welche Glühlampen hergestellt werden können, und erst innerhalb dieser engen Grenze können Erwägungen wirtschaftlicher Natur, wie Netzkosten, Ökonomie und Lebensdauer der Glühlampen u. dgl., Platz greifen.

Abgesehen von der selbstverständlichen Forderung, dass die Vergleichung auf Grund gleicher Netzleistung zu erfolgen hat, werden wir daher bei Niederspannungsnetzen zur Vergleichsgrundlage gleiche Lampenspannung und gleiche Elastizität, bei Fernleitungen (und Hochspannungsnetzen) dagegen gleiche Linienspannung und gleichen Spannungs- bezw. Energieverlust zu wählen haben. Es werden sich also zwei Reihen von Gleichungen entwickeln lassen, die diesen beiden Gesichtspunkten Genüge leisten.

145. Vergleich von Niederspannungsnetzen auf Grund gleicher Elastizität und Lampenspannung.

Bezeichnen wir mit η einen auf die Leiterzahl der verschiedenen Leitungssysteme bezüglichen, also veränderlichen Faktor, so können wir das Kupfervolumen eines Verteilungsnetzes ausdrücken durch

$$V = \Sigma \eta q l.$$

Der Vergleich soll für dasselbe Verteilungsgebiet bei Verwendung verschiedener Stromarten erfolgen, also können wir anstatt des Summenzeichens

und der Längen l eine Konstante einsetzen, so dass, falls wir allgemein als Spannungsabfall die bei gleicher Elastizität veränderliche Grösse $\frac{\varepsilon}{\cos\varphi}$ einführen,

$$V = C\eta q = C\eta \frac{J l \varrho}{\varepsilon/\cos\varphi} = C\eta \frac{J \mathcal{E} \cos\varphi}{p \mathcal{E}^2} l \varrho \quad . \quad . \quad . \quad (209)$$

wird. Die Zeichen haben die bekannte Bedeutung. Führen wir nun die konstanten Grössen $\mathfrak{E}$, die von dem Netz zu leistende Energie, und die Lampenspannung E_l ein, schreiben wir also

$$E_l = \lambda \mathcal{E}; \quad \zeta J \mathcal{E} \cos\varphi = \mathfrak{E},$$

wo λ und ζ weitere veränderliche Faktoren bedeuten, so wird, wenn wir alle unveränderlichen Grössen in die Konstante C einbegreifen:

$$V = C \frac{\eta \lambda^2}{p \zeta} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (XXXVIII)$$

Wir brauchen also nur den Grössen η, λ, ζ und p die den einzelnen Systemen eigentümlichen Werte zu geben, um die Verhältniszahlen für die Metallmengen zu erhalten.

1. Zweileitersystem.

Ein Unterschied zwischen Gleich- und Wechselstromnetzen ist, wie wir auch schon früher gesehen [**47**], nicht vorhanden. Es ist $p = 0{\cdot}02$, bezw. wenn wir den Faktor $\frac{1}{100}$ in C einschliessen,

$$p = 2; \quad \eta = 2; \quad \lambda = 2 \quad \text{und} \quad \zeta = 2,$$

da

$$\varepsilon = 0{\cdot}02\, \mathcal{E} \quad \text{und} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2} E = \frac{1}{2} E_l;$$

also wird

$$\boldsymbol{V_2 = 2\, C.}$$

2. Dreileitersystem.

Hier ist für $q_0 = 0{\cdot}5\, q$ bis $0{\cdot}25\, q$

$$\eta = 2{\cdot}5 \text{ bis } 2{\cdot}25; \quad p = 1{\cdot}5; \quad \lambda = 1; \quad \zeta = 2;$$

also

$$\boldsymbol{V_3 = 0{\cdot}83_3\, C \text{ bis } 0{\cdot}75\, C.}$$

3. Fünfleitersystem.

Für $q_p = q_n = 2\, q_{p0} = 2\, q_{n0} = 4\, q_0$ wird

$$\eta = 3{\cdot}25; \quad p = 1{\cdot}5; \quad \lambda = \frac{1}{2}; \quad \zeta = 2;$$

also

$$\boldsymbol{V_5 = 0{\cdot}27\, C.}$$

4. Drehstrom mit Dreieckschaltung.

$$\eta = 3; \quad p = 2; \quad \lambda = \sqrt{3}; \quad \zeta = 3;$$

also

$$V_{\Delta} = 1{\cdot}50\ C.$$

5. Drehstrom mit Sternschaltung.

Da bei reiner Motorenbelastung der Mittelleiter fehlen kann und dann der Spannungsverlust wegen der stets gleichen Belastung aller drei Phasen die Grösse 0·02 $\mathcal{E}$ annehmen darf, so haben wir die folgenden beiden Fälle zu unterscheiden:

a) Sternschaltung ohne Mittelleiter:

$$\eta = 3; \quad p = 2; \quad \lambda = 1; \quad \zeta = 3;$$

also

$$V_{\curlywedge 3} = 0{\cdot}50\ C.$$

b) Sternschaltung mit Mittelleiter vom Querschnitt 0·5 q bis 0·25 q:

$$\eta = 3{\cdot}5 \text{ bis } 3{\cdot}25; \quad p = 1{\cdot}5, \quad \lambda = 1; \quad \zeta = 3;$$

also

$$V_{\curlywedge 4} = 0{\cdot}77_8\ C \text{ bis } 0{\cdot}72_5\ C.$$

6. Zweiphasenstrom, unverkettet.

$$\eta = 4; \quad p = 1; \quad \lambda = 1; \quad \zeta = 2;$$

also

$$V_{\llcorner 4} = 2\ C,$$

wie beim Zweileitersystem.

7. Zweiphasenstrom, verkettet.

a) Der Querschnitt des Mittelleiters ist gleich dem Aussenleiterquerschnitt.

$$\eta = 3; \quad p = 1; \quad \lambda = 1; \quad \zeta = 2;$$

also

$$V_{\llcorner 3} = 1{\cdot}5\ C.$$

b) $q_0 = \sqrt{2} \cdot q$.

$$\eta = 2 + \sqrt{2} = 3{\cdot}41; \quad p = 1{\cdot}17; \quad \lambda = 1; \quad \zeta = 2;$$

also

$$V_{\llcorner 3} = 1{\cdot}46\ C,$$

also ein wenig günstiger als vorher.

Diese Werte gelten zugleich für die Speiseleiter, da ja der Spannungsabfall in ihnen wegen der Elastizität bei den verschiedenen Systemen in demselben Verhältnis steht wie der in den Verteilungsnetzen [133].

146. Gleiche Elastizität, verschiedene Lampenspannung.

Ist die Lampenspannung veränderlich, so erhält die Gleichung (209) die folgende Gestalt:

$$V = \frac{C}{E_l^2}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad \text{(XXXIX)}$$

d. h. die Kupfermengen der Leitungssysteme verhalten sich umgekehrt proportional zum Quadrat der Lampenspannung, so dass z. B. bei doppelter Lampenspannung nur der vierte Teil des Kupfers benötigt wird.

147. Gleiche Linienspannung und gleicher prozentualer Energieverlust. Hochspannungsleitungen.

Die bei Fernleitungen für die Beanspruchung der Isolation zweier Drähte in Frage kommende Spannung ist bei Gleichstrom die Linienspannung E, bei Wechselstrom dagegen der Maximalwert der Spannung, also falls wir sinusförmigen Verlauf der Spannungskurve voraussetzen,

$$E_m = \sqrt{2}\; E = 1{\cdot}41\; E.$$

Ferner soll der Energieverlust $p'\mathfrak{E}$ konstant sein, folglich wird auch p unveränderlich und kann in die Konstante C einbegriffen werden. Setzen wir also

$$E_m = \xi\, \mathcal{E},$$

so erhalten wir anstatt der Gleichung (XXXVIII) nunmehr:

$$V = C\, \frac{\eta\, \xi^2}{\zeta} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(XL)}$$

In Frage kommen für Hochspannungsfernleitungen nur das Zweileitersystem für Gleich- und Wechselstrom und die Mehrphasensysteme.

1. Zweileiter-Gleichstrom.

$$\eta = 2; \quad \zeta = 2; \quad \xi = 2: \quad \boldsymbol{V_{2g} = 4\; C.}$$

2. Zweileiter-Wechselstrom.

$$\eta = 2; \quad \zeta = 2; \quad \xi = 2\sqrt{2}: \quad \boldsymbol{V_{2w} = 8\; C.}$$

3. Drehstrom mit Dreieckschaltung.

$$\eta = 3; \quad \zeta = 3; \quad \xi = \sqrt{3}\cdot\sqrt{2}: \quad \boldsymbol{V_{\triangle} = 6\; C.}$$

4. Drehstrom mit Sternschaltung.

a) Ohne Mittelleiter:

$$\eta = 3; \quad \zeta = 3; \quad \xi = \sqrt{3}\cdot\sqrt{2}: \quad \boldsymbol{V_{\curlywedge 3} = 6\; C.}$$

b) Mit Mittelleiter, $q_0 = 0{\cdot}5\; q$ bis $0{\cdot}25\; q$.

$$\eta = 3{\cdot}5 \text{ bis } 3{\cdot}25; \quad \zeta = 3; \quad \xi = \sqrt{3}\cdot\sqrt{2}: \quad \boldsymbol{V_{\curlywedge 4} = 7\; C \text{ bis } 6{\cdot}5\; C.}$$

5. Zweiphasenstrom, verkettet.

$$\eta = 3; \quad \zeta = 2; \quad \xi = \sqrt{2}\cdot\sqrt{2}: \quad \boldsymbol{V_{\llcorner 3} = 6\; C.}$$

Wir erhalten demnach die folgende Zusammenstellung der Metallmengen, wenn wir die für Zweileiter-Gleichstrom gleich 100 setzen:

	V_{2g}	V_{2w}	V_3	V_5	$V_{\triangle}$	$V_{\curlywedge 3}$	$V_{\curlywedge 4}$	$V_{\llcorner 3}$
Gleiche Elastizität . .	100	100	41·7 bis 37·5	13·5	75·0	25·0	38·9 bis 36·2	75·0 (73·0)
Gleiche Linienspannung	100	200	—	—	150	150	175 „ 162	150.

Vergleich der mit den verschiedenen Systemen erreichbaren Speisegebiete.

148. **Mittlere Radien der Speisegebiete.**

Soll schliesslich noch der mittlere Radius des erreichbaren Speisegebietes für die verschiedenen elastischen Netzsysteme verglichen werden, so haben wir in Gleichung (209) l als veränderlich zu betrachten und erhalten:

$$V = \frac{C \eta_i \lambda^2 \mathfrak{E}}{p \zeta E_l^2} l^2.$$

Das aufzuwendende Kupfervolumen wächst also proportional mit dem Quadrat der Entfernung und mit der zu übertragenden Leistung, und umgekehrt proportional zum Quadrat der Lampenspannung. Für gleiche Leistung, gleiche Kupfermenge und gleiche Lampenspannung erhalten wir demnach:

$$l = \frac{C}{\lambda} \sqrt{\frac{p \zeta}{\eta_i}} \quad \text{. . . . . (XLI)}$$

und diese Gleichung giebt als Verhältnis der erreichbaren Entfernungen:

l_2	l_3	l_5	$l_\triangle$	$l_{\curlywedge 3}$	$l_{\curlywedge 4}$	$l_{\llcorner 4}$	$l_{\llcorner 3}$
100	155—163	272	115	200	160—167	100	115.

Praktische Erfahrungen haben ergeben, dass Zweileiteranlagen noch ökonomisch gebaut werden können, wenn bei etwa 100 Volt Lampenspannung die grösste Entfernung des Speisegebietes von der Centrale 500—800 m, bei 200 Volt Lampenspannung 800—1200 m beträgt. Legen wir diese Zahlen der Rechnung zu Grunde, so erhalten wir die folgenden Entfernungen:

	l_2	l_3	l_5	$l_\triangle$	$l_{\curlywedge 3}$	$l_{\curlywedge 4}$	$l_{\llcorner 3}$
$E_l = 100$:	500— 800	800—1300	1350—2200	600— 900	1000—1600	800—1300	600—900
$E_l = 200$:	800—1200	1250—1900	2200—3300	900—1400	1600—2400	1300—2000	900—1400.

Messung der mittleren Netzspannung.

149. Die Prüfdrähte.

Wir haben im Laufe der Untersuchung mehrfach gesehen, dass die Regulierung eines Netzes auf konstante Spannung im Maschinenhause durch Veränderung der Maschinenspannung bewerkstelligt wird, und zwar derart, dass die Speisepunkte des Netzes stets die gleiche, nämlich die mittlere Netzspannung besitzen. Zu diesem Zwecke muss natürlich die Spannung der Speisepunkte in der Centrale jederzeit ermittelt werden können, und das geschieht dadurch, dass entweder alle oder auch nur die wichtigeren Speisepunkte durch besondere Leitungen, die Spannungs- oder Prüfdrähte, mit einem Spannungsmesser in der Centrale verbunden werden. Bei unterirdischen Kabelnetzen sind diese Prüfdrähte gewöhnlich unmittelbar in die Kabel eingelegt (natürlich isoliert von der Kabelseele), bei oberirdischen Netzen werden sie gesondert auf Isolatoren verlegt.

Da diese Drähte nur einen sehr geringen Strom zu führen haben, so erhalten sie einen kleinen Querschnitt; bei Kabeln beträgt er gewöhnlich 1 mm^2. Um die Spannung an jedem einzelnen Speisepunkte als auch an allen zugleich (mittlere Netzspannung) messen zu können, werden die Prüfdrähte an entsprechend gebaute Umschalter geführt, die eine Verbindung des Spannungsmessers sowohl mit jedem einzelnen Drähtepaar als auch mit allen zugleich gestatten.

Setzen wir nun zunächst voraus, der Spannungsmesser vom Widerstande $2r$ sei mit einem Speisepunkte verbunden (Fig. 158), so erzeugt die Speisepunktsspannung E in dem Stromkreis einen Strom

$$i = \frac{E}{2(w+r)},$$

und die von dem Instrument angezeigte Spannung E' ist

$$E' = 2ir = E - 2iw,$$

also kleiner als die Speisepunktsspannung. Das Verhältnis beider Grössen ist

$$\frac{E'}{E} = \frac{r}{w+r} = \frac{1}{1+\frac{w}{r}},$$

also um so näher gleich der Einheit, je grösser r im Verhältnis zu w ist. Bei den gewöhnlichen technischen Spannungsmessern ist allerdings der innere Widerstand nicht so gross, dass $\frac{w}{r}$ gegen 1 vernachlässigt werden könnte. Ferner folgt auch, dass der Spannungsmesser bei gleichem E verschiedene Werte E' ergeben würde, falls w verschieden gross ist, d. h. also, falls die Entfernungen der Speisepunkte von der Centrale verschieden sind. Man umgeht diese beiden Schwierigkeiten dadurch, dass man durch Vorschaltwiderstände alle Prüfdrähte (Hin- und Rückleitungen) auf den gleichen Wert bringt, und zwar schaltet man gewöhnlich auch vor den längsten Prüfdraht noch einen kleinen Widerstand, um auf diese Weise zu runden Werten zu gelangen. Man erhält so für gleiches E auch die gleichen Instrumentangaben für alle Speisepunkte, wenn diese auch zunächst noch nicht die wahren Speisepunktsspannungen sind. Soll der Spannungsmesser auch die wahren Speisepunktsspannungen angeben, so hat man ihn nur unter Vor-

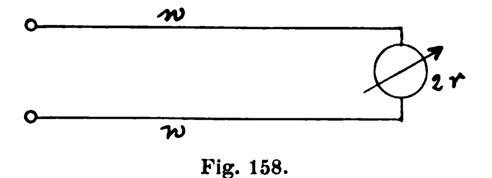


Fig. 158.

schaltung eines gleichen Widerstandes zu eichen, so dass die in Volt angegebene Teilung des Instrumentes dem Gesetz entspricht

$$E = 2\,i_0\,(w + r),$$

wenn i_0 derjenige Strom ist, der den Ausschlag E hervorbringt.

Liegen nun aber n Speisepunkte parallel am Spannungsmesser (Fig. 159), so sei vorausgesetzt, dass die mittlere Spannung

$$E_m = \frac{1}{n}\,\Sigma E_r = E = 2\,i_0\,(w + r)$$

ist. Es wird dann:

$$\mathcal{E}_I = i_I\,w + i_0 r$$
$$\mathcal{E}_{II} = i_{II}\,w + i_0 r$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$\mathcal{E}_n = i_n\,w + i_0 r$$
$$i_I + i_{II} + \cdots + i_n = i_0.$$

Also erhalten wir

$$\Sigma\mathcal{E} = n\,i_0\left(\frac{w}{n} + r\right)$$

und die mittlere Netzspannung, die der Spannungsmesser anzeigt, ist

$$E_m = \frac{1}{n}\,\Sigma E = 2\,i_0\left(\frac{w}{n} + r\right),$$

während

$$E_m = 2\,i_0\,(w + r)$$

sein soll. Der Spannungsmesser giebt also eine zu kleine Spannung an, und der Fehler ist um so grösser, je grösser die Zahl der angeschlossenen Speisepunkte ist. Um richtige Werte zu erhalten, hat man demnach entweder den noch fehlenden Widerstand $\frac{n-1}{n} w$ vor den gemeinsamen Schalterkontakt zu legen, oder man muss $2r$ so gross machen, dass $\frac{n-1}{n} w$ gegen r zu vernachlässigen ist.

Beispiel.

Setzen wir in runden Zahlen bei 110 Volt Netzspannung als grösste Speisekabellänge 1000 m und einen Querschnitt des Prüfdrahtes von 1 mm² ein, so wird der Prüfdrahtwiderstand

$$w_p = 1000 \cdot 0{\cdot}018 = 18 \ \Omega,$$

der auf $w = 20 \ \Omega$

abgerundet werden soll. Der Spannungsmesser habe einen inneren Widerstand von

$$2r = 1000 \ \Omega$$

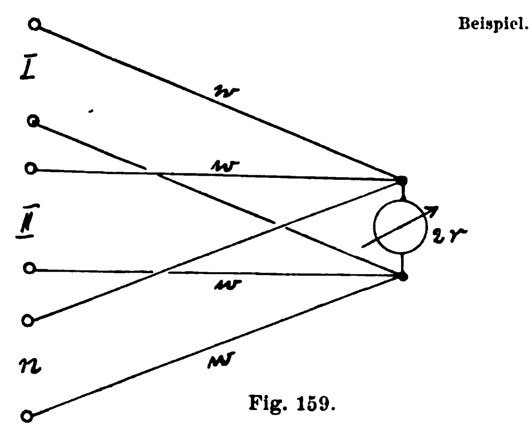


Fig. 159.

(Schaltbrettinstrument). Die Anzahl der angeschlossenen Speisepunkte sei

$$n = 10.$$

Dann wird:

$$w + r = 520,$$

und der Fehler in der Messung der mittleren Netzspannung beträgt

$$\frac{\frac{n-1}{n} w}{w + r} = \frac{0{\cdot}9 \cdot 20}{520} = 0{\cdot}035,$$

also $3{\cdot}5\,\%$, eine Grösse, die natürlich nicht vernachlässigt werden kann. Der vor den gemeinsamen Kontakt zu schaltende Widerstand würde

$$\frac{n-1}{n} w = 18 \ \Omega$$

betragen.

Hätte der Spannungsmesser einen inneren Widerstand von etwa 10000 Ω (Präzisionsinstrument), so würde der Fehler nur noch $0{\cdot}35\,\%$ betragen, also zu vernachlässigen sein.

Sachregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

Namenregister.

(Die Zahlen bedeuten die Seiten.)

M.O'T



